

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Návrh a dimenzování kondenzátorové baterie pro měniče
se stejnosměrným napájením**

**Design and Dimensioning of Capacitor Battery for Power
Converters Supplied by DC Voltage**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Juránek**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T015 Elektronika
Téma: **Návrh a dimenzování kondenzátorové baterie pro měniče se
stejnoseměrným napájením**
**Design and Dimensioning of Capacitor Battery for Power Converters
Supplied by DC Voltage**

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte náhradní model elektrolýtického kondenzátoru optimalizovaný pro aplikace výkonové elektroniky a popište jeho vlastnosti.
2. Navrhněte kondenzátorovou baterii pro měnič napájený střídavým zdrojem, výsledky teoretického výpočtu pak simulačně ověřte v prostředí OrCAD/PSpice.
3. V prostředí OrCAD/PSpice sestavte model polovodičového měniče napájeného z akumulátorů, v modelu zohledněte vnitřní parametry zdroje i motorické zátěže. Na základě simulačních výsledků navrhněte kondenzátorovou baterii pro tento typ měniče.
4. Vyhodnoťte dosažené výsledky a dle pokynů vedoucího diplomové práce vyjádřete závislost parametrů kondenzátorové baterie na vnitřních parametrech zdroje, zátěže i modulačním kmitočtu.

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Hava, A.M.; Ayhan, U.; Aban, V.V.: A DC bus capacitor design method for various inverter applications, ECCE, 2012 IEEE, vol., no., pp.4592,4599, 15-20 Sept. 2012
2. J. W. Kolar, T. M. Wolbank, and M. Schrodli: Analytical calculation of the RMS current stress on the dc link capacitor of voltage dc link PWM converter systems, IEE Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 81-89, 1999.
3. M.N. Anwar and M. Teimor: An analytical method for selecting DC-link-capacitor of a voltage stiff inverter, IEEE-IAS 2002 Conf. Rec., pp. 803-810.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Aleš Havel, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry

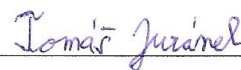


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

07. 05. 2014



vlastnoruční podpis autora

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a simulační analýzou kondenzátorové baterie pro měnič se střídavým a stejnosměrným napájením. V úvodních kapitolách jsou popsány základní vlastnosti kondenzátoru, náhradního modelu elektrolytického kondenzátoru a charakteristika elektrolytického kondenzátoru pro oblast výkonové elektroniky. Dále byl proveden teoretický návrh kondenzátorové baterie pro měnič napájený střídavým zdrojem, který byl poté simulačně ověřen v programu OrCAD/PSpice. Analýza kondenzátorové baterie proběhla i pro obvod tvořený střídačem napájeného z akumulátoru. V závěru práce jsou znázorněny jednotlivé závislosti kondenzátorové baterie na vnitřním odporu akumulátoru, spínací frekvenci střídače a vypočítán byl také ztrátový výkon kondenzátoru.

Klíčová slova

elektrolytický kondenzátor, kondenzátorová baterie, usměrňovač, střídač, akumulátor

Abstract

The Master's Thesis deals with design and simulation analysis of the capacitor battery for the converter supplied by alternating current (AC) and direct current (DC) power. The aim of the first chapters is to describe basic characteristics of a capacitor, an alternative model of the electrolytic capacitor and the characteristics of an electrolytic capacitor for the power electronics. Afterward, theoretical design of the capacitor battery for the converter supplied by AC power was realized and it was then verified by simulation in OrCAD/PSpice program. Analysis of the capacitor battery was also realized for the circuit consists of an inverter powered by a battery pack. At the end of the thesis, there are demonstrated different dependences of the capacitor battery and internal resistance of the battery, switching frequency of the inverter and it was also calculated power dissipation of the capacitor.

Key words

electrolytic capacitor, capacitor battery, rectifier, inverter, accumulator

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Aleši Havlovi, Ph.D., který mi pomáhal s přípravou této závěrečné práce.

Seznam použitých symbolů, zkratek a indexů

Symbol	Význam	Jednotka
C	kapacita kondenzátoru	[F]
C_{cap}	kapacita kondenzátorové baterie	[F]
C_i	kapacita jednoho kondenzátoru v baterii	[F]
C_{MIN}	minimální kapacita kondenzátorové baterie	[F]
d	vzájemná vzdálenost desek rovinného kondenzátoru	[m]
f	frekvence	[Hz]
f_z	základní frekvence	[Hz]
f_R	rezonanční frekvence	[Hz]
f_{REC}	vlastní kmitočet usměrňovače	[Hz]
f_{rc}	frekvence usměrňovače	[Hz]
f_s	spínací frekvence	[Hz]
I	elektrický proud	[A]
I_{bat}	proud z akumulátoru	[A]
$I_{\text{bat_max}}$	maximální okamžitý proud z akumulátoru	[A]
$I_{\text{bat_min}}$	minimální okamžitý proud z akumulátoru	[A]
$I_{\text{bat_RMS}}$	efektivní proud z akumulátoru	[A]
ΔI_{bat}	zvlnění proudu akumulátoru	[%]
I_d	proud v meziobvodu	[A]
I_{cap}	proud baterií kondenzátorů	[A]
$I_{\text{ci_RMS}}$	efektivní proud kondenzátorem baterie	[A]
$I_{\text{cin_A}}$	proud, amplituda n-té harmonické	[A]
$I_{\text{cin_RMS}}$	proud, efektivní hodnota n-té harmonické	[A]
I_{Cpeak}	špičkový nabíjecí proud	[A]
I_{CRMS}	efektivní nabíjecí proud	[A]
I_{DCpeak}	špičkový vybíjecí proud	[A]
I_{DCRMS}	efektivní vybíjecí proud	[A]
I_{RMS}	celkový efektivní proud	[A]
k_f	frekvenční koeficient	[-]
k_T	teplotní koeficient	[-]
k_V	počet větví kondenzátorové baterie	[-]
k_{VC}	počet kondenzátorů ve větvi	[-]

Seznam použitých symbolů, zkratek a indexů

L_{OPMAX}	doba života při jmenovité provozní teplotě	[-]
n	číslo harmonického frekvence	[-]
P	výkon měniče	[W]
p	počet pulzů usměřovače	[-]
P_{TOT}	celková výkonová ztráta kondenzátoru	[W]
Q	elektrický náboj	[C]
R_{LEAK}	svodový odpor kondenzátoru	[Ω]
R_i	vnitřní odpor baterie	[Ω]
R_{thc-a}	tepelný odpor kondenzátoru	[$^{\circ}C \cdot W^{-1}$]
R_{VSR}	balanční rezistor	[Ω]
S	plocha desek kondenzátoru	[cm ²]
$\tan(\delta)$	ztrátový činitel	[-]
T_{max}	maximální pracovní teplota kondenzátoru	[$^{\circ}C$]
T_c	teplota jádra kondenzátoru	[$^{\circ}C$]
t_c	nabíjecí doba	[s]
t_{dc}	vybíjecí doba	[s]
U	elektrické napětí	[V]
U_0	napětí naprázdno baterie	[V]
U_m	napětí mezibvodu	[V]
v	rychlost proudění	[m.s ⁻¹]
X_C	kapacitní reaktance	[Ω]
X_L	indukční reaktance	[Ω]
Z	impedance kondenzátoru	[Ω]
ϵ_0	permitivita vakua $8,8 \cdot 10^{-12}$	[F · m ⁻¹]
ϵ_r	relativní permitivita	[F · m ⁻¹]
Zkratka	Význam	Poznámka
ESR	ekvivalentní sériový odpor (equivalent series resistance)	
ESL	ekvivalentní sériová indukčnost (equivalent series inductance)	
SPWM	sinusová pulzně šířková modulace (sinusoidal pulse width modulation)	

Obsah

Úvod	1
1. Základní vlastnosti kondenzátoru	2
1.1 Charakteristické vlastnosti kondenzátorů	2
1.2 Značení a spojování kondenzátorů	3
1.3 Náhradní model elektrolytického kondenzátoru	4
1.3.1 Ekvivalentní sériový odpor (Equivalent series resistance, ESR)	4
1.3.2 Ekvivalentní sériová indukčnost (Equivalent series inductance, ESL)	5
1.3.3 Svodový odpor kondenzátoru R_{LEAK}	5
1.3.4 Celková výkonová ztráta kondenzátoru P_{TOT}	6
1.3.5 Impedance kondenzátoru Z	6
1.3.6 Ztrátový činitel kondenzátoru $\tan(\delta)$	6
1.3.7 Životnost kondenzátoru	7
1.3.8 Provozní teplota	8
1.3.9 Teplotní okruh kondenzátoru	9
1.4 Elektrolytický kondenzátor pro aplikace výkonové elektroniky	10
1.5 Konstrukce elektrolytického kondenzátoru	11
2. Výroba elektrolytických kondenzátorů	13
2.1 Způsob montáže	13
2.2 Zapojení kondenzátorů do baterie	15
2.2.1 Základní zapojení balančních rezistorů	16
3. Návrh kondenzátorové baterie pro nepřímý měnič kmitočtu	17
3.1 Teoretický výpočet	18
3.1.1 Proces nabíjení kondenzátorové baterie	22
3.1.2 Proces vybíjení kondenzátorové baterie	24
3.2 Simulace kondenzátorové baterie v nepřímém měniči kmitočtu	26
3.2.1 Popis zapojení a nastavení veličin	26
3.3 Výsledky simulací obvodu kondenzátorové baterie se střídavým napájením	29
3.3.1 Simulace zvlnění napětí meziobvodu a kapacity jednoho kondenzátoru	29
3.3.2 Simulace napětí meziobvodu a kapacity kondenzátoru	31
3.3.3 Simulace proudu kondenzátorem a spínací frekvence	32

4. Návrh kondenzátorové baterie pro měnič napájený z akumulátoru	33
4.1 Rozbor návrhu	33
4.2 Popis zapojení a nastavení veličin	33
4.3 Výsledky simulaci kondenzátorové baterie se stejnosměrným napájením	36
4.3.1 Simulace napětí meziobvodu a vnitřního odporu akumulátoru	36
4.3.2 Simulace proudu jednoho kondenzátoru a vnitřního odporu akumulátoru	37
4.3.3 Simulace proudu meziobvodu a vnitřního odporu akumulátoru	38
4.3.4 Simulace zvlnění proudu při různé spínací frekvenci	39
5. Výpočet životnosti kondenzátoru	42
Závěr	44
Literatura	45
Příloha I	

Úvod

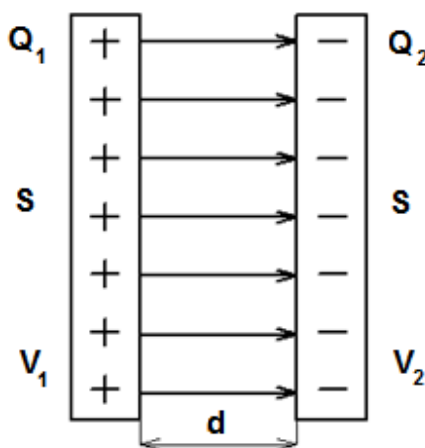
S nástupem rozvoje výkonové elektroniky po druhé světové válce došlo zároveň ke zvýšení kvality pasivních součástek. Jedna z nejpoužívanějších pasivních součástek v elektrotechnických aplikacích je kondenzátor. Podle druhu aplikace jsou na něj kladeny různé specifické požadavky, které ovlivňují konečný výběr. Pro aplikace výkonové elektroniky je převážně používán elektrolytický kondenzátor. Právě elektrolytický kondenzátor je obsahem teoretické části.

V následující praktické části je nejprve řešen návrh kondenzátorové baterie pro obvod tvořený nepřímým měničem. V teoretickém návrhu kondenzátorové baterie proběhlo kapacitní a proudové dimenzování. Na základě výsledků dimenzování byl vybrán vhodný kondenzátor a jeho funkčnost byla simulačně ověřena v programu OrCAD.

V další kapitole došlo ke změně druhu napájení obvodu ze střídavého na stejnosměrné. Zde byly analyzovány vlivy na průběhy napětí a proudu baterií, které způsobuje změna vnitřního odporu akumulátoru a změna spínací frekvence. Závěrečná kapitola obsahuje kalkulaci životnosti použitého kondenzátoru a vyhodnocení analýzy kondenzátorové baterie.

1. Základní vlastnosti kondenzátoru

Kondenzátor je pasivní elektronická součástka, jejíž hlavní vlastností je kapacita, respektive schopnost akumulace elektrického náboje. Kondenzátory jsou druhou nejpoužívanější součástkou po rezistorech používané v diskrétních obvodech a v elektrických zařízeních. Princip činnosti spočívá v přivedení elektrického náboje opačné polarity na pár vodivých desek. Vodivé desky jsou odděleny izolačním materiálem označovaným jako dielektrikum, které zabraňuje kontaktu elektrického náboje opačné polarity a zároveň v sobě hromadí elektrický náboj (obr. 1). [1], [2]



Obr. 1. Schéma deskového kondenzátoru

1.1 Charakteristické vlastnosti kondenzátorů

Jmenovitá kapacita kondenzátoru (charakteristický parametr) – výrobcem předpokládaná hodnota kapacity vyznačená na kondenzátoru. Většina typů kondenzátorů je vyráběna s kapacitou určenou řadou E6 nebo E12.

Tolerance jmenovité kapacity kondenzátoru – největší odchylka skutečné kapacity kondenzátoru od jmenovité kapacity vyjádřené v procentech.

Jmenovité napětí (mezí parametr) – největší napětí, na které je kondenzátor konstruován. Nesmí být překročeno.

Provozní napětí – nejvyšší napětí, které může být trvale připojeno na kondenzátor. Nepřesáhne-li teplota okolí + 40°C, rovná se maximální provozní napětí jmenovitému. Při vyšší teplotě je nutné provozní napětí snížit. [3]

Ideální kondenzátor je charakterizován konstantní hodnotou kapacity, která je definována jako poměr mezi nábojem a elektrickým napětím (1).

$$C = \frac{Q}{U} [F] \quad (1)$$

Tento vztah říká, že kondenzátor s kapacitou $C [F]$ a napětím $U [V]$ přiloženým na jeho svorkách má v sobě uložen náboj $Q [C]$. Napětí $U [V]$ a proud $I [A]$ na kondenzátoru jsou vázaný vztahem (2).

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt} [A] \quad (2)$$

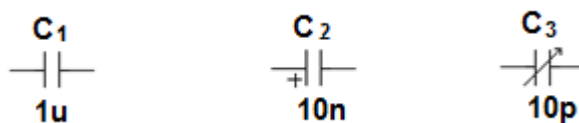
Z toho je patrné, že proud kondenzátoru je přímo úměrný změně napětí na jeho svorkách. Způsoby k dosažení co nejvyšší kapacity při co nejmenších rozměrech pro danou aplikaci kondenzátoru vyjadřuje vzorec pro deskový kondenzátor (3).

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (3)$$

Odtud vyplývá, že kapacita roste s rostoucí relativní permitivitou ε_r a plochou desek S , zatímco klesá se vzájemnou vzdáleností desek d . Proto výrobci zvyšují kapacitu vkládáním dielektrika s relativně vysokými hodnotami permitivity ε_r . [1], [2]

1.2 Značení a spojování kondenzátorů

Na následujícím obrázku (obr. 2) jsou znázorněny schematické značky: C1 obecný kondenzátor, C2 kondenzátor s jedinou možností polarit napětí (elektrolytický) a C3 kondenzátor s proměnnou hodnotou kapacity.



Obr. 2. Schematické značky kondenzátorů

Při paralelním spojení kondenzátorů se výsledná kapacita rovná součtu kapacit jednotlivých kondenzátorů:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (4)$$

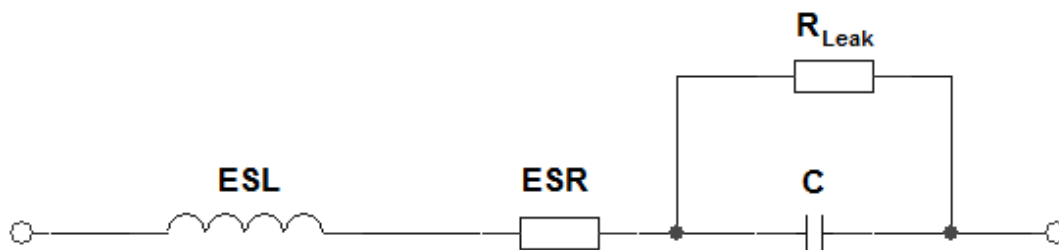
Při sériovém spojení se převrácená hodnota výsledné kapacity rovná součtu převrácených hodnot jednotlivých kapacit.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (5)$$

Kondenzátory lze zapojit v obvodu sériově, paralelně či kombinací obou variant.

1.3 Náhradní model elektrolytického kondenzátoru

Základní náhradní model elektrolytického kondenzátoru (obr. 3) znázorňuje nežádoucí parazitní vlastnosti, které mají všechny typy kondenzátorů. Obecně se dá říct, že základní elektrické chování kondenzátoru lze popsat sériovým zapojením kapacity kondenzátoru spolu se sériovým odporem *ESR* a sériovou indukčností *ESL*.



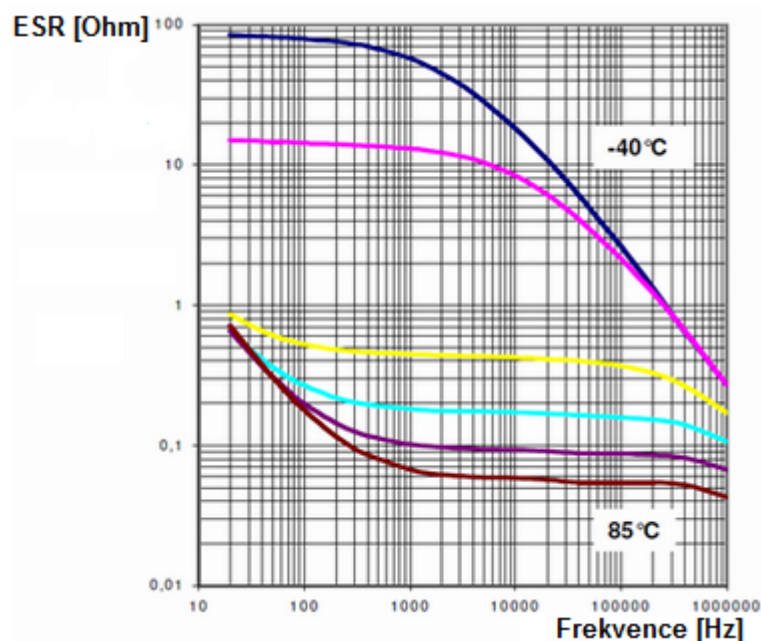
Obr. 3. Schéma náhradního modelu kondenzátoru [5]

1.3.1 Ekvivalentní sériový odpor (Equivalent series resistance, ESR)

ESR se používá ve všech kondenzátorech z důvodu, že desky kondenzátoru nejsou dokonalým vodičem elektrického proudu a mají tak konečný odpor daný vodivostí použitého materiálu. Rovněž dielektrikum není dokonalým izolantem a má vodivost, která se dá v praxi vyjádřit odporem řádově 10-1000 MΩ. Tato parazitní vodivost se podílí na parametru udávající ztráty v dielektriku a je součástí vztahu popisujícího ztrátový činitel dielektrika vyjádřený vzorcem (6). [4], [5]

$$\tan(\delta) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot ESR[-] \quad (6)$$

Je to velmi důležitý údaj u kondenzátorů pro impulsní zdroje a měniče. Velký ESR znamená velké přídavné ztráty, zvýšené oteplení a malou životnost. Velikost ESR stejně jako hodnoty ESL a C závisí na frekvenci a teplotě, konkrétně hodnota ESR klesá s rostoucí teplotou a frekvencí (obr. 4).



Obr. 4. Vliv frekvence a teploty na hodnotu ESR [1]

Velmi vážný problém zejména u hliníkových elektrolytických kondenzátorů je to, že ESR se zvyšuje v průběhu času provozu kondenzátoru. Zvýšené ESR způsobuje zrychlené stárnutí obvodu, častější závady a vede až ke zničení. Hodnotu ESR můžeme měřit u kondenzátorů od 10mF pomocí měřiče ESR . [1]

1.3.2 Ekvivalentní sériová indukčnost (Equivalent series inductance, ESL)

ESL je vytvořena konstrukčním provedením desek kondenzátoru a dalších kontaktních přívodních vodičů, které také markantně ovlivňují celkovou parazitní indukčnost kondenzátoru, hlavně ve vysokofrekvenčních obvodech. Rozměry a kapacita kondenzátoru má největší vliv na tuto parazitní indukčnost. [4]

1.3.3 Svodový odpor kondenzátoru R_{LEAK}

R_{LEAK} tvoří odpor izolace, která obklopuje elektrody kondenzátoru a dielektrika. Jeho hodnota je závislá na teplotě, při zvýšení teploty se hodnota sníží a pohybuje se v řádech stovek $M\Omega$ až jednotek $G\Omega$.

1.3.4 Celková výkonová ztráta kondenzátoru P_{TOT}

Pro výpočet celkové výkonové ztráty kondenzátoru (7), dosazujeme efektivní hodnoty proudu a hodnoty ESR kde indexy značí jednotlivé harmonické procházejícího proudu, počet těchto harmonických závisí na typu zátěže. Výkonová ztráta způsobuje růst teploty v kondenzátoru.

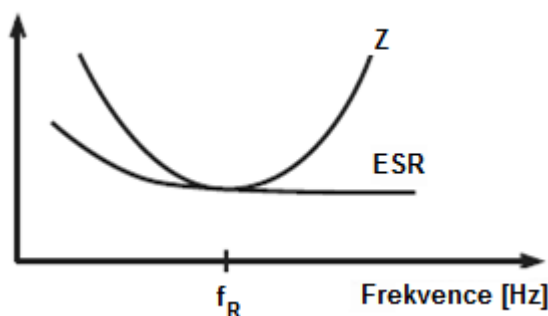
$$P_{TOT} = P_{(1)} + P_{(2)} + \dots + P_{(n)} = I_{1_RMS}^2 \cdot ESR_1 + I_{2_RMS}^2 \cdot ESR_2 + \dots + I_{n_RMS}^2 \cdot ESR_n [W] \quad (7)[5]$$

1.3.5 Impedance kondenzátoru Z

Pro výpočet impedance kondenzátoru platí vzorec (8).

$$Z = \sqrt{ESR^2 + (X_L - X_C)^2} [\Omega] \quad (8)$$

Náhradní model kondenzátoru představuje sériový rezonanční obvod, který má kapacitní charakter je - li $f < f_r$, dále odporový charakter $f = f_r$ a induktivní charakter $f > f_r$, kde f_r je rezonanční frekvence (1,5 – 150kHz). Vliv frekvence na hodnotu impedance vyjadřuje obr. 5.



Obr. 5. Vliv frekvence na hodnotu impedance [5]

1.3.6 Ztrátový činitel kondenzátoru $\tan(\delta)$

Ukazatelem kvality kondenzátoru je ztrátový činitel $\tan(\delta)$, vyjádřen vzorcem (6). Jedná se o bezrozměrnou veličinu znázorňující poměr mezi odporovou a kapacitní složkou. Čím je hodnota ztrátového činitele nižší, tím je kondenzátor kvalitnější a tedy vhodnější pro práci ve vysokofrekvenčních obvodech. Jeho hodnota se pohybuje v řádech desetin, setin, u kvalitních kondenzátorů v řádech tisícín (při 1kHz). V provozu se ztrátový činitel projevuje jako paralelně připojený odpor, jímž prochází ztrátový proud fázově posunutý o 90° . Na velikost ztrátového činitele má mimo jiné vliv skladování, kde se působením teploty a vlhkosti jeho hodnota zvětšuje. [5]

1.3.7 Životnost kondenzátoru

Doba života kondenzátoru je hodnota závisající na teplotě jádra kondenzátoru, respektive na teplotě okolí. Každý kondenzátor obsahuje ve svém katalogovém listu graf L_{OP} , jako funkci teploty, případně lze určit hodnotu L_{OP} pomocí převodního vzorce (9), v tomto případě od firmy Kendeil, který platí pro ostatní teploty v daném rozsahu. [1]

$$L_{OP} = L_{OPMAX} \cdot 2^{\frac{A-T_c}{C}} \quad (9)[5]$$

L_{OPMAX} – doba života při jmenovité provozní teplotě (např.: 10000hodin při 85°C)

T_{max} – maximální pracovní teplota kondenzátoru [°C]

T_c – teplota jádra kondenzátoru [°C]

Příklad výpočtu provozní životnosti kondenzátoru:

Chceme-li vypočítat provozní životnost L_{OP} , musíme znát provozní napětí kondenzátoru U [V], proud kondenzátoru I_{RMS} [A], okolní teplotu T_a [°C] a tepelný odpor R_{thc-a} [°C/W]. [5], [6]

$$P_{TOT} = I_1^2 \cdot ESR_1 + I_2^2 \cdot ESR_2 + \dots + I_n^2 \cdot ESR_n [W] \quad (10)$$

$$T_c = T_a + I_{CRMS}^2 \cdot ESR \cdot R_{thc-a} [°C] \quad (11)$$

$$L_{OP} = f(T_c) \quad (12)$$

Nejprve najdeme hodnotu ESR pro správnou frekvenci a teplotu T_c [°C] v tabulce ESR a vypočteme ztrátový výkon P_{TOT} . Je-li proud složen z různých harmonických, vypočteme výkonovou ztrátu pro každou harmonickou a sečteme. Tepelný odpor mezi kondenzátorem a okolím se nachází v tabulce R_{thc-a} . Po výpočtu T_c zkontrolujeme, zda souhlasí s předpokládanou hodnotou ESR , které bylo vybráno a vypočteme L_{OP} . [6]

$$L_{OP} = L_{OPMAX} \cdot 2^{\frac{A-T_c}{C}} \quad (13)$$

Hodnoty parametrů L_{OPMAX} a C , jsou katalogové hodnoty. Hodnota ESR elektrolytického kondenzátoru závisí na teplotě a frekvenci, často pro teplotu 20°C a frekvenci 100Hz. Z tabulky ESR (tab. 1) je možné vypočítat hodnotu ESR při jiných teplotách a frekvencích.

Tab. 1. Tabulka ESR [5]

f [kHz]	T _c – teplota kondenzátoru [°C]									
	-40	-20	0	20	40	50	60	70	85	100
0,05	11,6	4,4	2,0	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7
0,10	11,2	4,0	1,6	1,0	0,92	0,02	0,93	0,95	0,99	1,0
0,15	11,0	3,8	1,4	0,86	0,75	0,75	0,75	0,76	0,79	1,82
0,30	10,9	3,7	1,3	0,71	0,59	0,58	0,57	0,57	0,59	0,61
0,40	10,9	3,6	1,3	0,68	0,55	0,54	0,53	0,53	0,54	0,56
0,60	10,8	3,6	1,2	0,64	0,51	0,49	0,48	0,48	0,49	0,50
0,80	10,8	3,6	1,2	0,62	0,49	0,47	0,46	0,46	0,46	0,48
1,00	10,8	3,6	1,2	0,61	0,48	0,46	0,45	0,44	0,45	0,46
2,00	10,8	3,6	1,2	0,59	0,45	0,43	0,42	0,42	0,42	0,43
5,00	10,8	3,5	1,2	0,58	0,44	0,42	0,40	0,40	0,40	0,41

Hodnota R_{thc-a} pro elektrolytické kondenzátory závisí na okolní teplotě, teplotě pouzdra, R_{th} hodnotě chladiče a rychlosti proudění vzduchu kolem kondenzátoru (tab. 2). Pokud se nejedná o chlazení nucené, předpokládáme, že rychlost proudění vzduchu je 0,5 m/s. [1]

Tab. 2. Tabulka R_{th} [5]

T _c [°C]	v = 0,5 m/s		v = 1,0 m/s		v = 1,5 m/s		v = 2,0 m/s		v = 2,5 m/s	
	R _{thc-a} [°C/W]	R _{th} [°C/W]	R _{thc-a} [°C/W]	R _{th} [°C/W]	R _{thc-a} [°C/W]	R _{th} [°C/W]	R _{thc-a} [°C/W]	R _{th} [°C/W]	R _{thc-a} [°C/W]	R _{th} [°C/W]
55	2,9	3,5	2,6	3,1	2,3	2,8	2,1	2,6	2,0	2,5
60	2,9	3,4	2,6	3,1	2,3	2,8	2,1	2,6	2,0	2,5
70	2,9	3,4	2,5	3,0	2,3	2,8	2,1	2,6	1,9	2,5
80	2,9	3,4	2,5	3,0	2,2	2,8	2,1	2,6	1,9	2,5

1.3.8 Provozní teplota

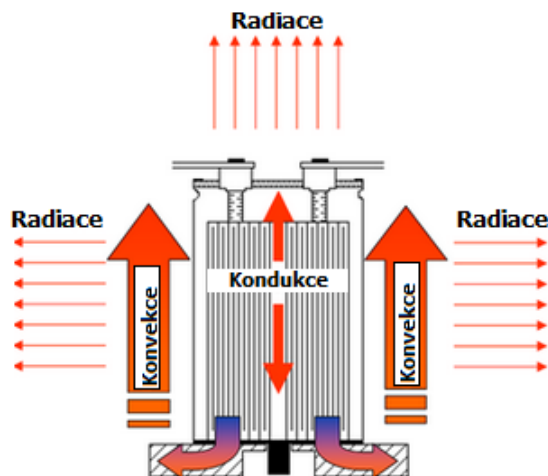
Významný vliv na životnost elektrolytických kondenzátorů má provozní napětí a zejména provozní teplota. Je-li například hliníkový elektrolytický kondenzátor provozován na 0,9 jmenovitého napětí je poruchovost snížena na 60 % v porovnání s provozem při jmenovitém napětí. Pokud se snižuje provozní teplota, zdvojnásobuje se životnost při každých 10°C pod jmenovitou teplotu. Nižší teplota má za následek zpoždění šíření plynných částí elektrolytu přes koncové těsnění a výrazné snížení vysychání kondenzátoru. [8]

Teplota, která je důležitá pro životnost kondenzátoru se může určit od okolní teploty T_a :

$$T_c = T_a + I_{CRMS}^2 \cdot ESR \cdot R_{thc-a} [^\circ C] \quad (14) [8]$$

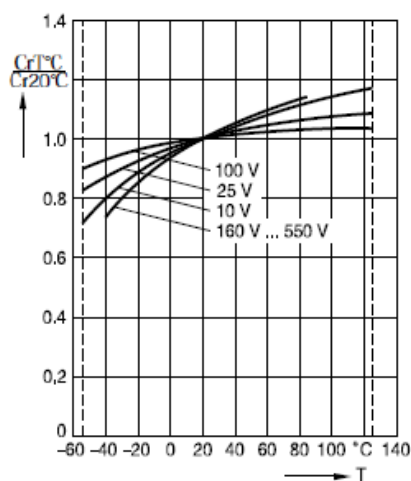
1.3.9 Teplotní okruh kondenzátoru

Z místa s vysokou teplotou je teplo vždy přenášeno do oblasti s nižší teplotou. Existuje několik způsobů jak teplo přenést přes hliníkovou fólii a elektrolyt. Je-li kondenzátor namontován na chladič, je část tepla odvedena přes chladič do okolí. Snížování teploty zvyšuje viskozitu elektrolytu což má za následek snížení jeho vodivosti. Průběhy přenosů tepla kondukcí, radiací a konvekcí (obr. 6).



Obr. 6. Přenosy tepla v elektrolytickém kondenzátoru [1]

U charakteristických křivek závislosti kapacity na teplotě (obr. 7) si můžeme všimnout strmějšího růstu při nižším jmenovitém napětí a vyšší drsnosti povrchu anody. Nejvhodnějšího plochého tvaru křivek se dosáhne použitím speciálního elektrolytu, který zajistí, že kondenzátory mohou být provozovány při teplotách hluboko pod nulou.



Obr. 7. Teplotní závislost kondenzátoru [1]

1.4 Elektrolytický kondenzátor pro aplikace výkonové elektroniky

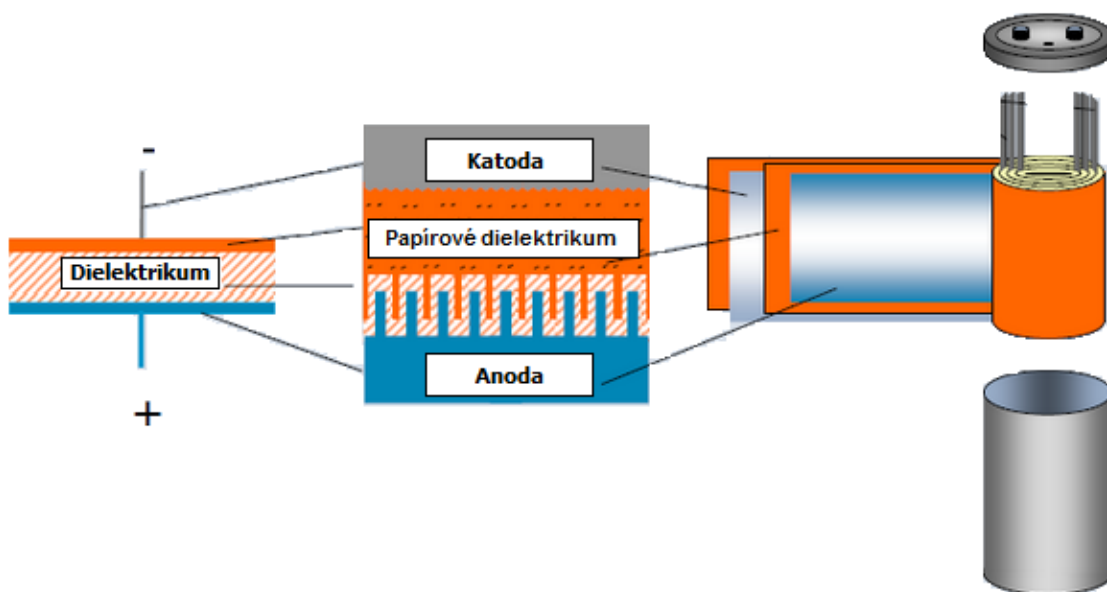
Nejčastěji se vyskytující se kondenzátor ve výkonové elektronice je elektrolytický kondenzátor (obr. 8). Ten se vyznačuje největšími hodnotami kapacit na jednotku objemu, vysokou spolehlivostí, vynikajícím poměrem cena/výkon. Toho je dosaženo použitím velmi tenkého porézního dielektrika se současně velkou elektrickou pevností a typickou hodnotou relativní permitivity $\varepsilon_r \approx 10$. Oproti ostatním druhům kondenzátorů představuje speciální skupinu, protože jeho funkce částečně závisí na elektrochemických procesech.

Hliníkový elektrolytický kondenzátor bude fungovat správně pouze v případě, že kladný pól je připojen na fólii anody a záporný pól na fólii katody. V opačném případě zapojení polarit vzniká elektrolytický proces, který vede k vytvoření dielektrické vrstvy na fólii katody. To způsobí silnou emisi vnitřního tepla a plynu, vedoucí až ke zničení kondenzátoru a navíc se zvětšováním tloušťky oxidu na fólii katody značně klesá celková hodnota kapacity.

Při nesprávné polaritě je však po krátkou dobu přípustná hodnota napětí až 1,5 V. To je hodnota průrazného napětí vrstvy oxidu vzduchu, kterou je pokryta fólie katody. Elektrolytické kondenzátory jsou pro případ přepólování, případně velkého překročení jejich dovoleného pracovního napětí opatřeny přetlakovou pojistkou, z níž některé druhy se chovají podobně jako zpětný ventil. Kondenzátor je součástíka s podstatně zvýšeným činitelem poruchovosti, například ve srovnání s rezistorem.

I proto jsou hliníkové elektrolytické kondenzátory obecně rozděleny do dvou základních kategorií spolehlivosti: kondenzátory pro aplikace s vysokou spolehlivostí a kondenzátory pro univerzální aplikace. Toto rozlišení bylo rovněž přijato v příslušných normách IEC.

V normách IEC jsou hliníkové elektrolytické kondenzátory pro aplikace s vysokou spolehlivostí označovány jako kondenzátory se stupněm „Long Life“ a zkratka LL je vyražena na jejich obale. Obecně platí, že materiály použité u hliníkových elektrolytických kondenzátorů musí splňovat přísné požadavky na čistotu a u kondenzátorů LL stupně se používají pro výrobu materiály speciálně vybrané. Hliníkové elektrolytické kondenzátory jsou vyráběny v různých provedeních uzávěru, například se šroubovými svorkami, jednostrannými a axiálními vývody. [1] [6]



Obr. 8. Konstrukční schéma kondenzátoru – varianta I [1]

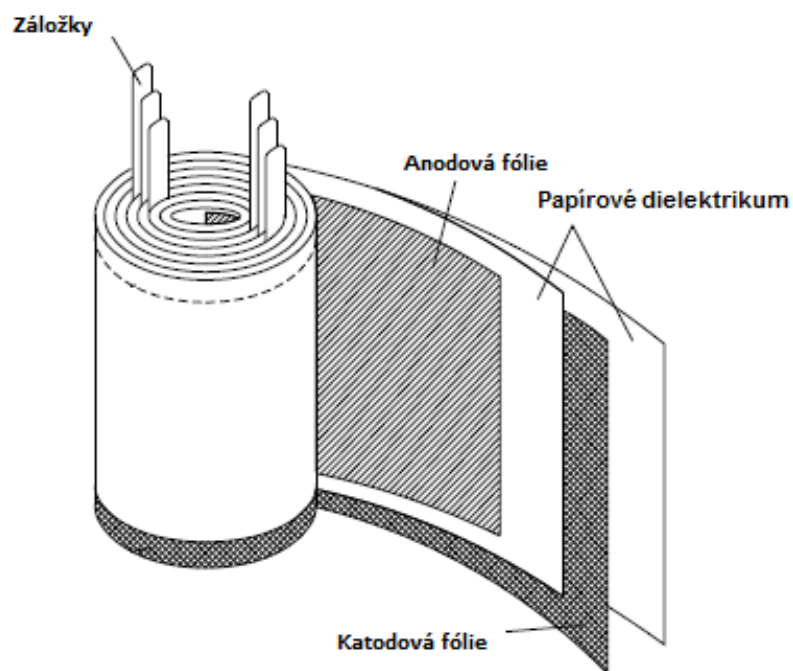
1.5 Konstrukce elektrolytického kondenzátoru

Stejně jako u všech kondenzátorů, i hliníkový elektrolytický kondenzátor se skládá ze dvou vrstev elektricky vodivého materiálu, které jsou odděleny dielektrickou vrstvou (obr. 9). Oproti jiným druhům kondenzátorů (keramickým, svitkovým, slídovým) netvoří jednu z elektrod – katodu – kovová elektroda, nýbrž vodivý elektrolyt (kapalný nebo pevný). Z hlediska chemických reakcí nesmí elektrolyt reagovat s materiály uvnitř kondenzátoru, tedy s vývody, s hliníkem, s Al_2O_3 , pryží, plasty a materiálem separátoru, a zároveň musí umožňovat elektrolytickou oxidaci hliníku. Převážně je složen ze směsi vody, etylenglykolu, vyšších alkoholů, solí a různých aditiv. Elektrolyt musí být vysoce elektricky vodivý, v rozsahu pracovních teplot kondenzátoru nesmí zamrznat ani vřít.

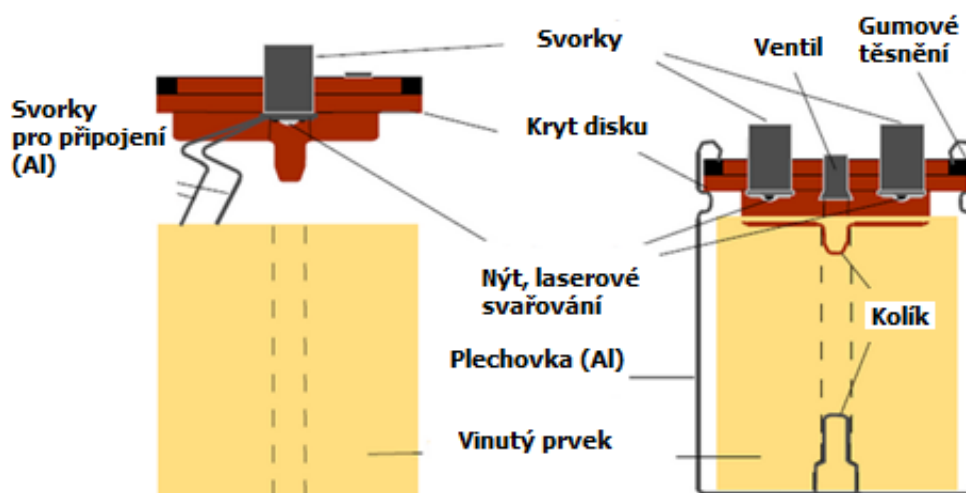
Protielektroda - anoda je tvořena hliníkovou fólií extrémní čistoty. Za účelem zvětšení povrchu, hodnoty kapacity je elektrochemicky naleptána a rovněž elektrochemickým způsobem je vytvořena izolační vrstvička Al_2O_3 , která tvoří vlastní dielektrikum, což je důvodem vysoké tolerance kapacity.

Tohle označujeme jako takzvané formování dielektrika anodickou oxidací.

Katodová fólie vytváří velkoplošný přívod proudu pro elektrolyt, který je nasáknut ve speciálním papíru. Má za úlohu bránit vzniku zkratu mezi fóliemi (separátor) a navíc zajišťuje minimální napěťovou bezpečnost kondenzátoru. Na čistotě materiálu kovových fólií, kvalitě separátoru a i na kvalitě uzávěru kondenzátoru závisí jeho výsledná kvalita a také životnost. Obě fólie se separátorem jsou jako jeden celek svinut do svitku a neprodyšně uzavřen v hliníkovém případně plastovém pouzdře (obr. 10). [6]



Obr. 9. Konstrukční schéma kondenzátoru - varianta II [1]



Obr. 10. Konstrukční schéma kondenzátoru - varianta III [1]

2. Výroba elektrolytických kondenzátorů

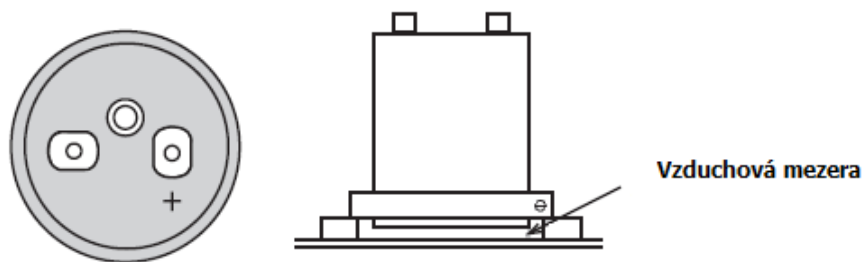
Izolační vrstva Al_2O_3 na anodové fólii se tvoří ve výrobě procesem zvaným formování kondenzátoru. V současnosti se používá tzv. předformovaná fólie. Nový kondenzátor tedy teoreticky nepotřebuje další formování. Při výrobě se používá oxidovaná fólie šířky, kterou si obvykle řeže výrobce kondenzátorů z širokých rolí. Hrany fólie ve svitku tedy oxidované nebývají a teprve při formování se na nich vytváří vrstva oxidu.

Na automatické výrobní lince bývají kondenzátory rychle formovány a měřeny. V rámci dřívějších výrobních postupů se ale i nové kondenzátory větších kapacit nebo pro vyšší napětí dlouhodobě formovaly v tzv. formovacích stojanech po několika stovkách kusů. Každý kondenzátor měl ve stojanu svou dvojici svorek a svou kontrolní žárovku s číslem svorek. Bylo tak velmi snadné pouhou optickou kontrolou vyřadit vadný kus. V dnešní době a při dnešních objemech výrob je něco podobného zcela vyloučeno a jen při výrobě nejdražších průmyslových kondenzátorů přebírají kusové měření a kontrolu automaty.

Protože hliníková fólie obsahuje zbytky atomů cizích prvků a vrstvička Al_2O_3 rovněž není nikdy zcela homogenní, prochází kondenzátorem po připojení na jmenovité napětí malý proud, zvaný zbytkový nebo také svodový. Delším beznapěťovým skladováním nebo odstavením přístroje z provozu na delší dobu dochází k rozpouštění izolační vrstvy Al_2O_3 , tzv. odformování. Takto odformovaný kondenzátor má značně sníženo jmenovité provozní napětí a značně vysoký zbytkový proud, rovnající se několikatisícinásobku zbytkového proudu, běžného pro dotyčný typ. Takto odformované kondenzátory velkých kapacit je velmi nebezpečné připojovat přímo k "tvrdému" zdroji stejnosměrného napětí, protože jednak mohou přílišným počátečním proudem zničit usměrňovače nebo jiné prvky v zařízení, a prudkým ohřevem kondenzátoru při novém formování hrozí exploze přetlakem uvnitř kondenzátoru. [6]

2.1 Způsob montáže

Správná montáž je nezbytná pro splnění dostatečně dlouhé životnosti kondenzátoru (obr. 11). Bezpečnostní ventil by měl být směrem nahoru, aby se horká pára vodivého elektrolytu mohla při krizové situaci z bezpečnostního otvoru odvést. Při upevnění chlazení na spodní část kondenzátoru je výhodné, když je mezi kondenzátorem a chladičem vzduchová mezera.



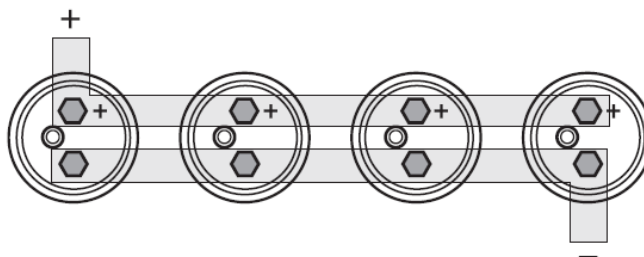
Obr. 11. Způsoby správné montáže [5]

Při montáži kondenzátorů blízko sebe musí být mezi kondenzátory dodržena minimální vzdálenost 5 mm tak, aby byla zajištěna dostatečná cirkulace vzduchu. Dále je důležité, aby šrouby, kterými je uchycen kondenzátor měly dostatečný utahovací moment (tab. 3).[6]

Tab. 3. Utahovací momenty [5]

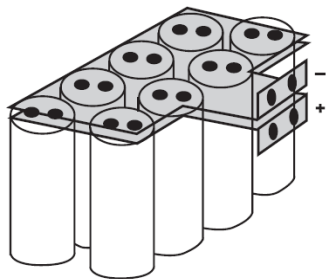
Způsob připojení	Max. utahovací moment
Terminál se šroubem M5	2 Nm
Terminál se šroubem M6	4 Nm
Centrální šroub M8	4 Nm
Centrální šroub M12	8 Nm

Často ve vysoko proudových aplikacích je nezbytné použít více paralelních větví. Distribuce proudu musí být do všech větví stejná. Což je zajištěno použitím pásového vodiče s nízkou hodnotou indukčnosti a tvarem (obr. 12).



Obr. 12. Tvar pásového vodiče pro paralelní větve kondenzátorů [5]

Další zásadou je, že pásový vodič záporného pólu musí překrývat pásový vodič kladného pólu (obr. 13).



Obr. 13. Zapojení pásových vodičů s naznačením kladného a záporného pólu [5]

2.2 Zapojení kondenzátorů do baterie

Při zapojení více než jednoho kondenzátoru požadujeme rovnoměrné rozdělení napětí mezi kondenzátory. A to za předpokladu, že hodnoty kapacit kondenzátoru jsou stejné, tudíž i výsledná impedance je shodná. Avšak reálná hodnota kapacity se pohybuje v rámci tolerance, tedy nelze jednoduše rozdělit přiložené napětí na všechny kondenzátory v sérii. Pro krajní případ, kdy hodnota kapacity je na maximálním resp. minimálním kraji dané tolerance, využijeme následující vzorec (15) pro výpočet napětí na kondenzátoru, známe-li přiložené napětí, toleranci a počet kondenzátorů v sérii.

Příklad výpočtu hodnot napětí na kondenzátoru a balančních rezistorů:

Dva kondenzátory 350V s tolerancí $\pm 20\%$, jsou spojeny v sérii, na obou je tedy 700V. jedná se o nejhorším případ, jeden kondenzátor má maximální hodnotu kapacity a druhý má minimální hodnotu kapacity.

Kondenzátor připojený na 700V bude vystaven minimální hodnotě, při toleranci 20%:

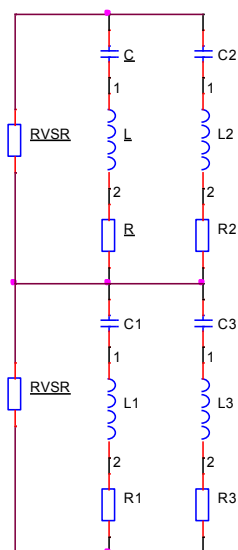
$$U_{cap} = \frac{U_{apl} \cdot Tolerance_{max}}{Tolerance_{max} + (n-1) \cdot Tolerance_{min}} = \frac{700 \cdot 1,2}{1,2 + 0,8} = 420V \quad (15)[5]$$

n – počet kondenzátorů v sérii

Často užívaná možnost eliminace vlivu tolerance je použití tzv. balančních rezistorů, které zabezpečí rovnoměrné rozdělení napětí mezi oba kondenzátory. Hodnota těchto odporů se vypočítává podle vzorce (16). Jejich použití můžeme při praktickém výpočtu vlivu tolerance zanedbat a jednoduše počítat se stejným rozložením napětí na kondenzátory v sérii.

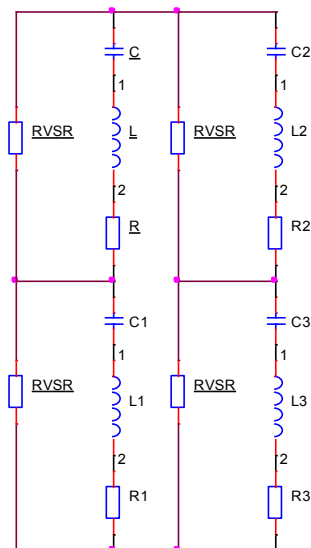
$$R_{VSR} = \frac{1000}{0,015 \cdot C} = \frac{1000}{0,015 \cdot 4700 \cdot 10^{-6}} = 14k\Omega \quad (16)[5]$$

2.2.1 Základní zapojení balančních rezistorů



Obr. 14 Zapojení balančních rezistorů -1. Typ[5]

V tomto zapojení jsou dva balanční rezistory, jejichž balancující vlastnosti se zlepšují se zvyšujícím počtem paralelních větví (obr. 14). Tyto odpory musí být spolehlivé, při jejich selhání dojde ke zničení ostatních kondenzátorů.



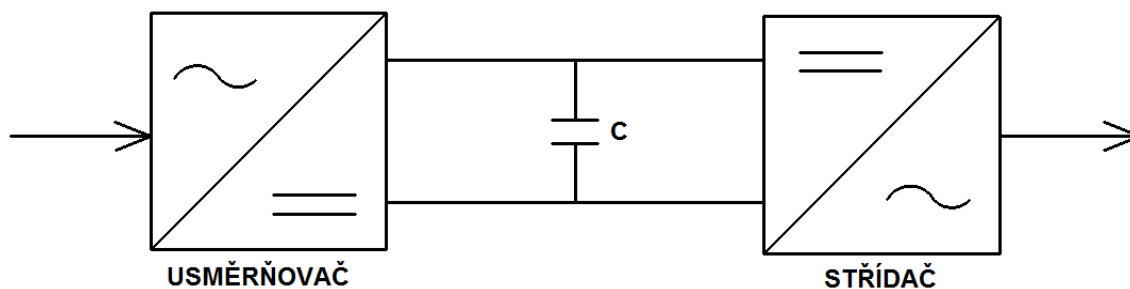
Obr. 15. Zapojení balančních rezistorů -2. Typ [5]

U tohoto typu zapojení balančních rezistorů v případě poruchy jednoho kondenzátoru nedojde ke zničení pouze kondenzátoru v dané sériové větvi (obr. 15).

3. Návrh kondenzátorové baterie pro nepřímý měnič kmitočtu

Nepřímý měnič kmitočtu se sestává z usměrňovače (zpravidla připojeného přes transformátor na rozvodnou síť), který vstupní střídavé napětí a střídavý proud o vstupním (síťovém) kmitočtu usměrní a ze střídače, který usměrněné napětí a proud rozstřídá na požadovaný kmitočet (obr. 16). Stejnoseměrný obvod od sebe odděluje oba střídavé obvody – vstupní a výstupní. Tím je umožněno řízení výstupního kmitočtu zcela nezávisle na kmitočtu vstupním.

Charakter měniče kmitočtu určuje způsob filtrace v stejnosměrném neboli také mezilehlém obvodu. Při využití kondenzátoru jako filtru hovoříme o nepřímém měniči kmitočtu s napěťovým střídačem (napěťový typ měniče kmitočtu) a je-li pro filtraci proudu meziobvodu využita tlumivka, hovoříme o nepřímém měniči kmitočtu s proudovým střídačem (proudového typu). [7]



Obr. 16. Nepřímý měnič kmitočtu

3.1 Teoretický výpočet

Zadání:

Obvod je tvořen třífázovým zdrojem 230/400 V, 50 Hz, vstupní měnič je neřízený šestipulzní usměrňovač. Na výstup usměrňovače je připojena kondenzátorová baterie. Jako zátěž je použit střídač s motorickou zátěží. Výstupní výkon má hodnotu 10 kW, napětí v meziobvodu měniče nesmí klesnout na hodnotu $U_{MIN} = 540 \text{ V}$; $U_{MAX} = 565 \text{ V}$ (požadované zvlnění napětí je 2,26 %).

Kapacitní dimenzování:

Vlastní kmitočet usměrňovače

Nejdříve vypočítáme vlastní kmitočet usměrňovače, v našem případě šesti pulzního usměrňovače s frekvencí napájecí sítě 50 Hz:

$$f_{REC} = p \cdot f = 6 \cdot 50 = 300 \text{ Hz} \quad (17)$$

Minimální hodnota kapacity kondenzátoru

Výpočet minimální hodnoty kapacity napěťového obvodu, která splňuje kritérium zvlnění při dané frekvenci, provedeme dosazením výkonu měniče $P = 10 \text{ kW}$ a rozdílu kvadrátu maximálního a minimálního napětí:

$$C_{MIN} = \frac{2 \cdot P}{(U_{MAX}^2 - U_{MIN}^2) \cdot f_{REC}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^3}{(565^2 - 540^2) \cdot 300} = 2,4 \text{ mF} \quad (18)$$

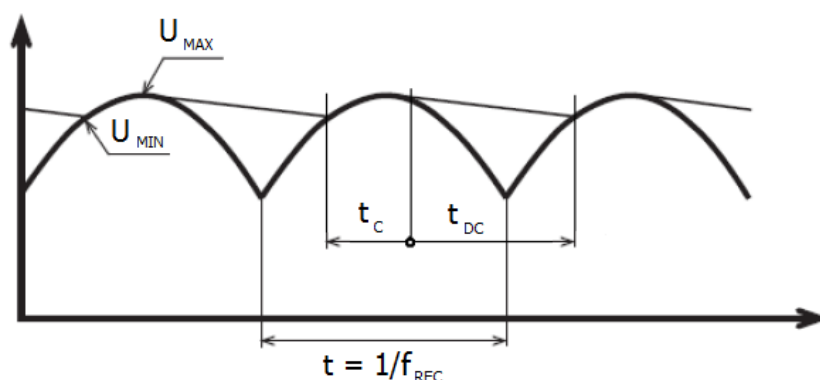
Nabíjecí doba

$$t_C = \frac{\arccos \frac{U_{MIN}}{U_{MAX}}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\arccos \frac{540}{565}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,95 \text{ ms} \quad (19)$$

Vybíjecí doba

$$t_{DC} = \frac{1}{f_{REC}} - t_C = \frac{1}{300} - 0,00095 = 2,38 \text{ ms} \quad (20)$$

Výše uvedené veličiny jsou znázorněny na obrázku 17:



Obr. 17. Průběh napětí v meziobvodu [5]

Proudové dimenzování pro hodnotu C_{MIN} :

Špičkový nabíjecí proud

$$I_{Cpeak} = C_{MIN} \cdot \frac{dU}{dt_C} = C_{MIN} \cdot \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{dt_C} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{565 - 540}{0,95 \cdot 10^{-3}} = 63,15 A \quad (21)$$

Efektivní nabíjecí proud

$$I_{CRMS} = \sqrt{I_{Cpeak}^2 \cdot t_C \cdot f_{REC}} = \sqrt{63,15^2 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 33,71 A \quad (22)$$

Špičkový vybíjecí proud

$$I_{DCpeak} = C_{MIN} \cdot \frac{dU}{dt_{DC}} = C_{MIN} \cdot \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{dt_{DC}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{565 - 540}{2,38 \cdot 10^{-3}} = 25,21 A \quad (23)$$

Efektivní vybíjecí proud

$$I_{DCRMS} = \sqrt{I_{DCpeak}^2 \cdot t_{DC} \cdot f_{REC}} = \sqrt{25,21^2 \cdot 2,38 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 21,3 A \quad (24)$$

Celkový efektivní proud

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{CRMS}^2 + I_{DCRMS}^2} = \sqrt{33,71^2 + 21,3^2} = 39,87 A \quad (25)$$

Na základě těchto výsledků bude kondenzátorová baterie složena ze sério-paralelní kombinace kondenzátorů s kapacitní hodnotou $C_i = 2,2 \text{ mF}$. Tato baterie se skládá z 3 větví, v každé větvi budou v sérii zapojeny 2 kondenzátory, tudíž celková hodnota kondenzátorové baterie je $C_{BAT} = 3,3 \text{ mF}$. Výpočet této hodnoty probíhal dle následujícího vztahu, kde $k_{vc} = 2$ (počet kondenzátoru ve větvi), $k_v = 3$ (počet větví baterie).

Přepočtené hodnoty pro novou hodnotu $C_i = 2,2 \text{ mF}$:

$$C_{Cap} = \frac{C_i}{k_v} \cdot k_v = \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 3 = 3,3 \text{ mF} \quad (26)$$

$$I_{Cpeak} = C_{Cap} \cdot \frac{dU}{dt_c} = C_{Cap} \cdot \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{dt_c} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{565 - 540}{0,95 \cdot 10^{-3}} = 86,84 \text{ A} \quad (27)$$

$$I_{CRMS} = \sqrt{I_{Cpeak}^2 \cdot t_c \cdot f_{REC}} = \sqrt{86,84^2 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 46,36 \text{ A} \quad (28)$$

$$I_{DCpeak} = C_{Cap} \cdot \frac{dU}{dt_{DC}} = C_{BAT} \cdot \frac{(U_{MAX} - U_{MIN})}{dt_{DC}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{565 - 540}{2,38 \cdot 10^{-3}} = 34,66 \text{ A} \quad (29)$$

$$I_{DCRMS} = \sqrt{I_{DCpeak}^2 \cdot t_{DC} \cdot f_{REC}} = \sqrt{34,66^2 \cdot 2,38 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 29,29 \text{ A} \quad (30)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{CRMS}^2 + I_{DCRMS}^2} = \sqrt{46,36^2 + 29,29^2} = 54,83 \text{ A} \quad (31)$$

I_{RMS} - závisí úměrně na velikosti kapacity, rozdílu maximálního a minimálního napětí, frekvenci usměrňovače a nabíjecí době. Úpravou předchozích vztahů dostaneme tento zjednodušený vzorec pro I_{RMS} :

$$I_{RMS} = C_{Cap} \cdot \Delta U \sqrt{\frac{f_{REC}}{t_c \cdot (1 - f_{REC} \cdot t_c)}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \sqrt{\frac{300 \cdot 10^3}{0,95 \cdot (1 - 300 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3})}} = 54,83 \text{ A} \quad (32)$$

Tab. 4. Tabulka koeficientů pro řadu kondenzátorů s označením K01 pro výpočet I_{RMS_real} . [8]

Frekvence	k_f	Teplota	K_T
50 Hz	0,8	35°C	2,2
100 Hz	1,0	45°C	2,1
500 Hz	1,2	55°C	1,8
1000 Hz	1,3	65°C	1,6
>10 kHz	1,5	75°C	1,4

I_{RMS_i} – do vzorce dosazujeme vypočtenou hodnotu I_{RMS} dále koeficient počtu větví $k_v = 3$ a z tabulky koeficientů (tab. 4) jsem vybral pro frekvenci menší než 10kHz koeficient frekvence $k_f = 1,5$ a pro teplotu 45°C platí koeficient $k_T = 2,1$.

$$I_{RMS_i} = \frac{I_{RMS}}{k_v \cdot k_f \cdot k_T} = \frac{54,83}{3 \cdot 1,5 \cdot 2,1} = 5,8 \text{ A} \quad (33)$$

Po aplikování koeficientů vychází a na základě tohoto výsledku vyhovuje kondenzátor s označením K01400222__M0G105, ze řady K01 s kapacitou 2,2 mF, maximálním proudem 8,3 A a provozním napětím 400 V.

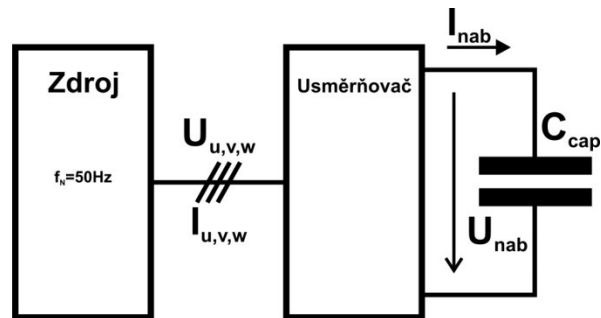
Výpočet balančních rezistorů

Tyto rezistory budou zajišťovat rovnoměrné rozložení napětí na jednotlivých kondenzátorech a to bez ohledu na jejich skutečnou kapacitu, která se vždy bude mírně lišit s ohledem na výrobní toleranční rozptyl.

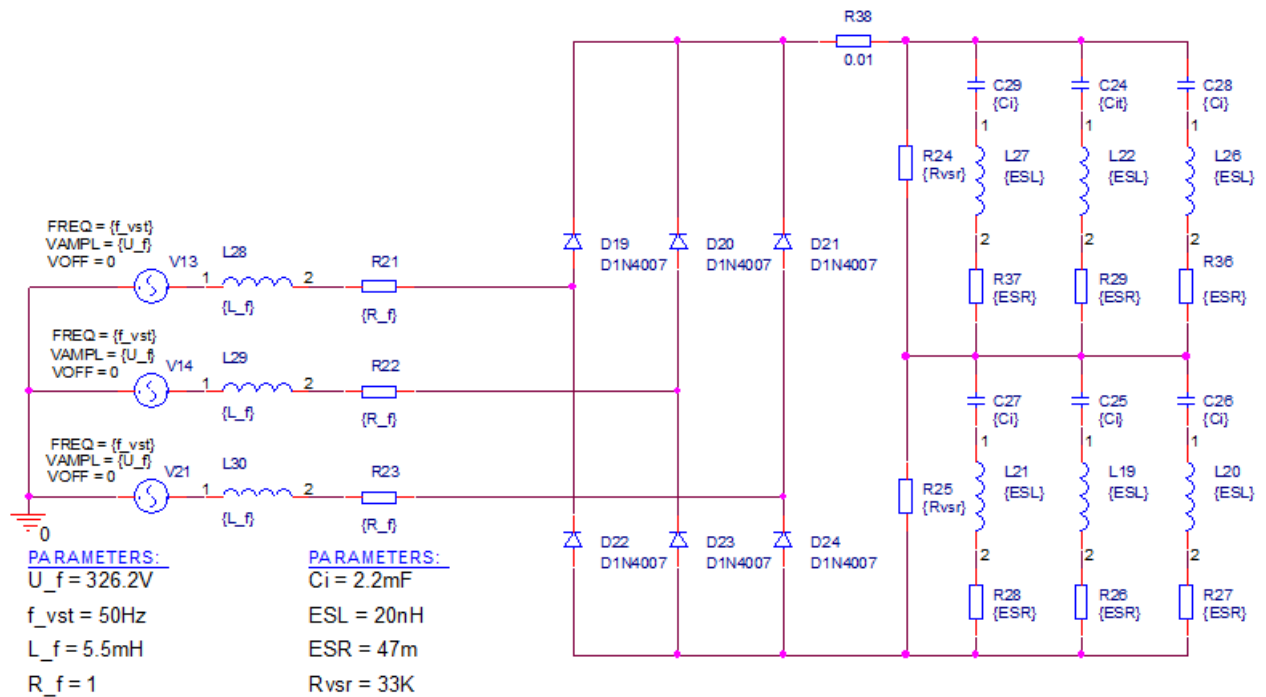
$$R_{VSR} = \frac{1000}{0,015 \cdot C} = \frac{1000}{0,015 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}} = 30,3 \text{ k}\Omega \quad (34)$$

3.1.1 Proces nabíjení kondenzátorové baterie

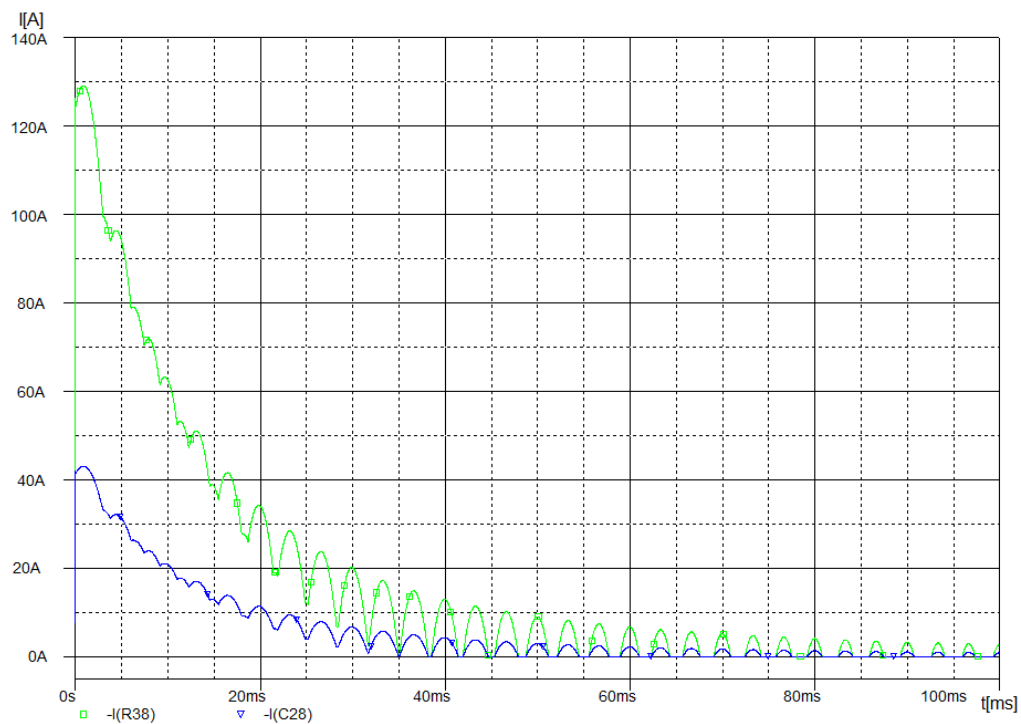
Kondenzátorová baterie je napájena přes šestipulsní usměrňovač z třífázového zdroje zapojeného do hvězdy. Zjednodušené schéma tohoto obvodu je na obr. 18 a simulační schéma znázorňuje obr. 19.



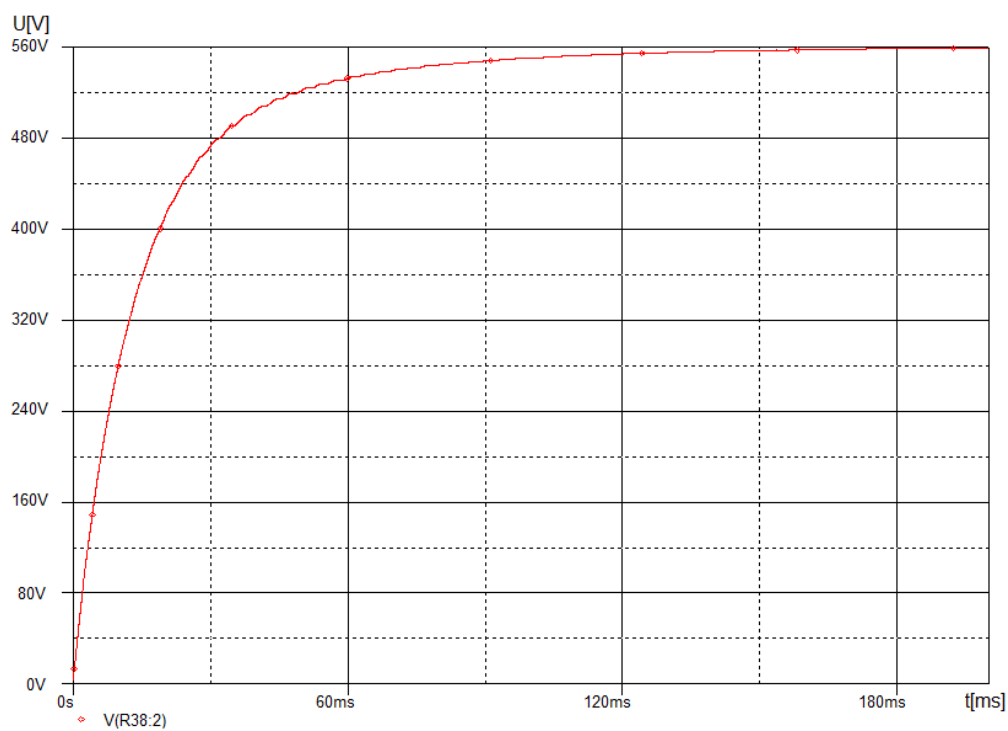
Obr. 18. Blokové schéma zapojení pro nabíjení



Obr. 19. Schéma vstupního neřízeného usměrňovače a kondenzátorové baterie

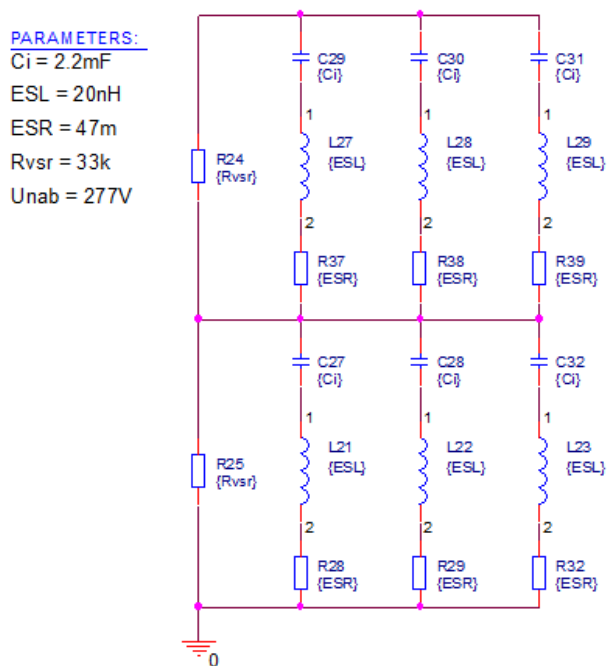


Obr. 20. Průběh proudů při nabíjení

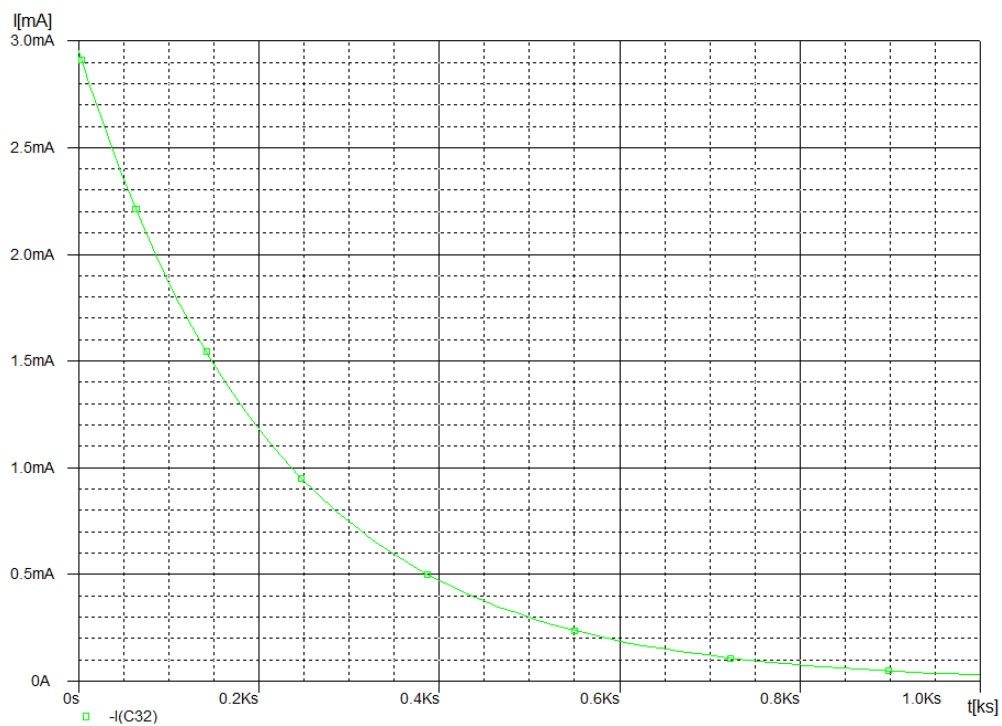


Obr. 21. Průběh napětí při nabíjení kondenzátorové baterie

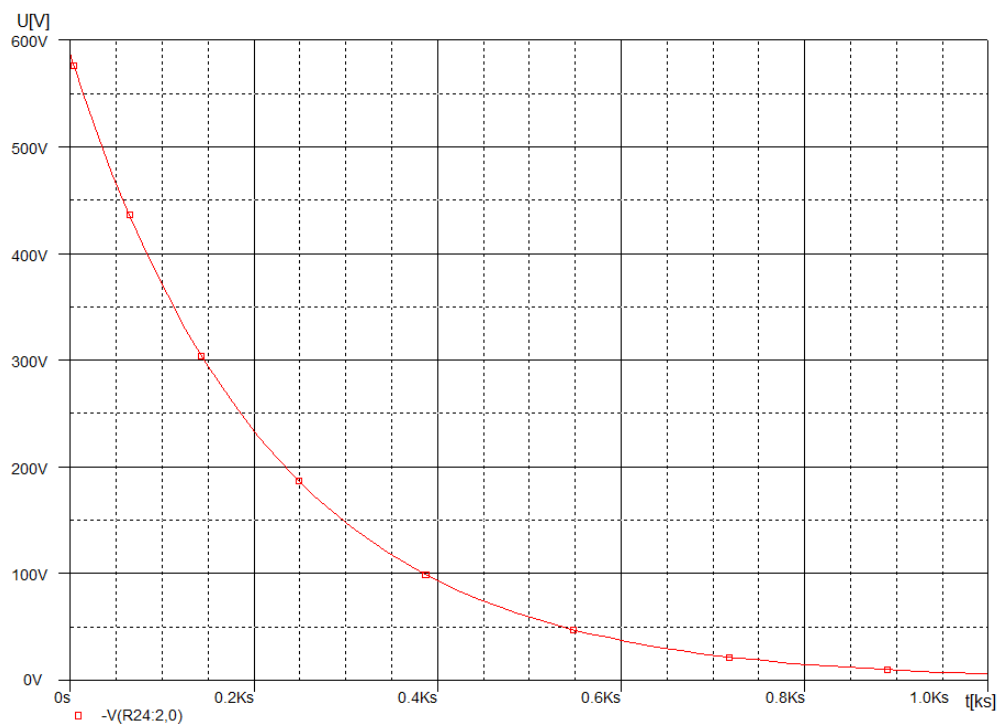
3.1.2 Proces vybíjení kondenzátorové baterie



Obr. 22. Schéma kondenzátorové baterie s balančními rezistory



Obr. 23. Průběh proudu na kondenzátoru při vybíjení kondenzátorové baterie

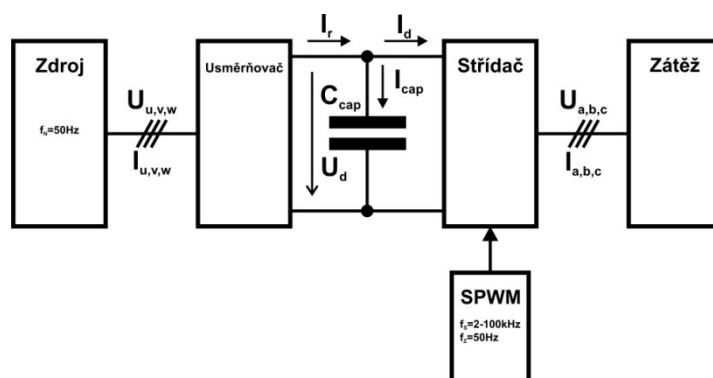


Obr. 24. Průběh napětí při vybíjení kondenzátorové baterie

3.2 Simulace kondenzátorové baterie v nepřímém měniči kmitočtu

3.2.1 Popis zapojení a nastavení veličin

K ověření návrhu bylo v simulačním programu OrCAD vytvořeno zapojení, skládající se z třífázového zdroje na vstupu zapojeném do hvězdy. Z tohoto zdroje byl napájen šestifázový usměrňovač. Výstupem usměrňovače je navržená kondenzátorová baterie. Jako zátěž je připojen střídač s IGBT tranzistory buzený SPWM modulací. Na výstup střídače je připojena motorická zátěž, jež představuje zjednodušený model asynchronního motoru. Tvoří ji obvod R -L zapojený do hvězdy. Zjednodušené schéma tohoto obvodu je na obr. 25 a simulační schéma znázorňuje obr. 26.

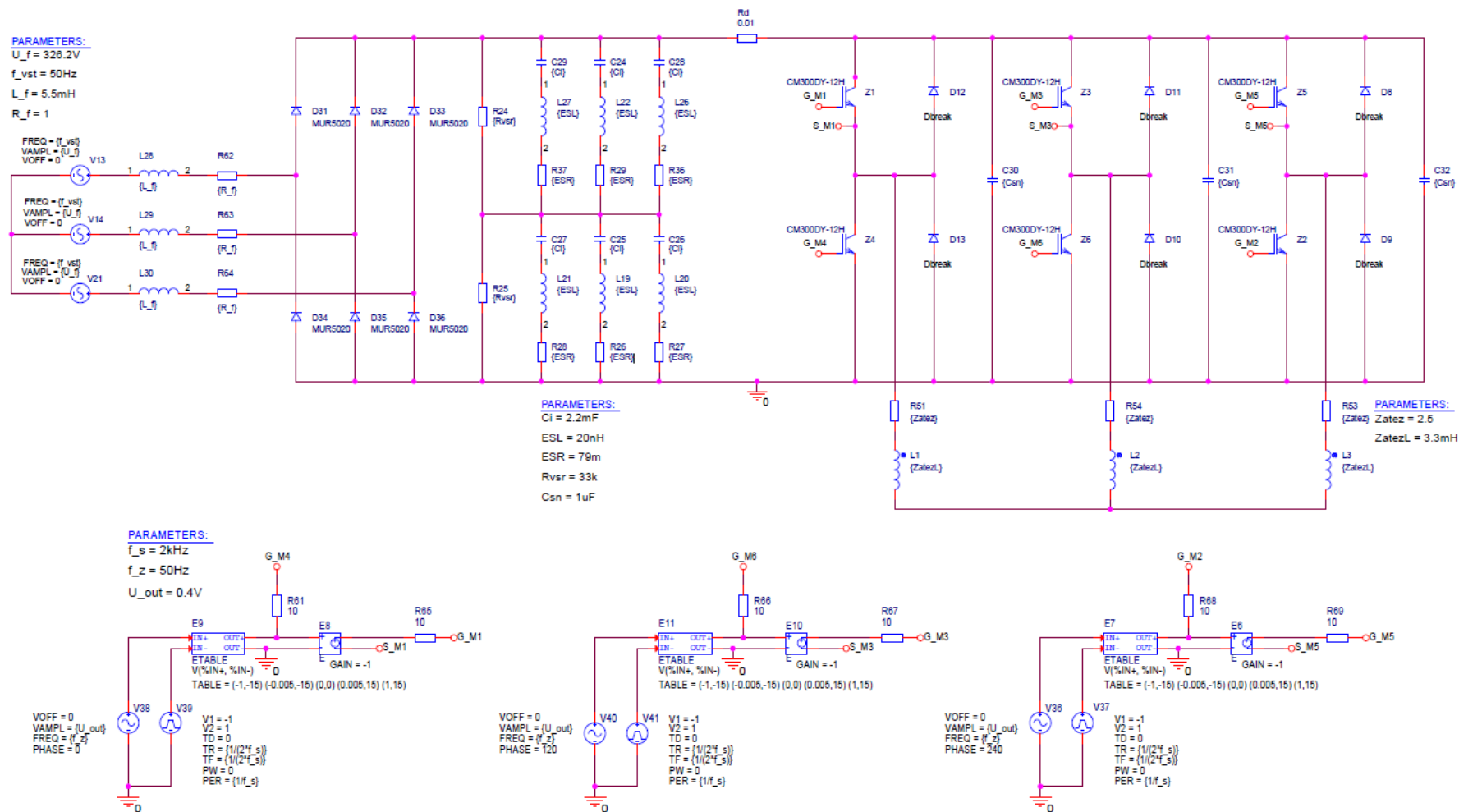


Obr. 25. Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu

Nastavení jednotlivých obvodových veličin a parametry použitých funkčních bloků jsou v tabulce 5.

Tab. 5. Nastavení obvodových veličiny nepřímého měniče

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka	Označení ve schématu
Zdroj	V13,V14,V21			
Napětí zdroje	U_f	326,2	[V]	U_f
Frekvence	f_{rc}	50	[Hz]	f_{vst}
Indukčnost na		5,5	[mH]	L_f
Vnitřní odpor zdroje		1	[Ω]	R_f
Usměrňovač	D31-D36			
Typ diody	MUR5020			
Závěrné napětí	U_r	200	[V]	
Proud v propustném směru	I_f	50	[A]	
Střídač	Z1 - Z6			
Typ IGBT	CM300DY – 12H			
Proud kolektoru	I_c	300	[A]	
Napětí kolektor - emitor	U_{CE}	600	[V]	
Zátěž	R - L			
Odpor	R	2,5	[Ω]	Zatez
Indukčnost	L	3,3	[mH]	ZatezL



Obr. 26. Schéma nepřímého měniče s kondenzátorovou baterií v OrCADU,.

3.3 Výsledky simulací obvodu kondenzátorové baterie se střídavým napájením

3.3.1 Simulace zvlnění napětí meziobvodu a kapacity jednoho kondenzátoru

Tab. 6. Hodnoty pro výpočet zvlnění napětí v meziobvodu

U_{d_max} [V]	597
U_{d_min} [V]	467
U_{d_RMS} [V]	541
$\Delta U_{\%_d}$ [%]	24,0%

Výpočet rozkmitu napětí v meziobvodu

$$\Delta U_d = U_{d_max} - U_{d_min} = 597 - 467 = 130V \quad (35)$$

Výpočet poměrného zvlnění napětí v meziobvodu

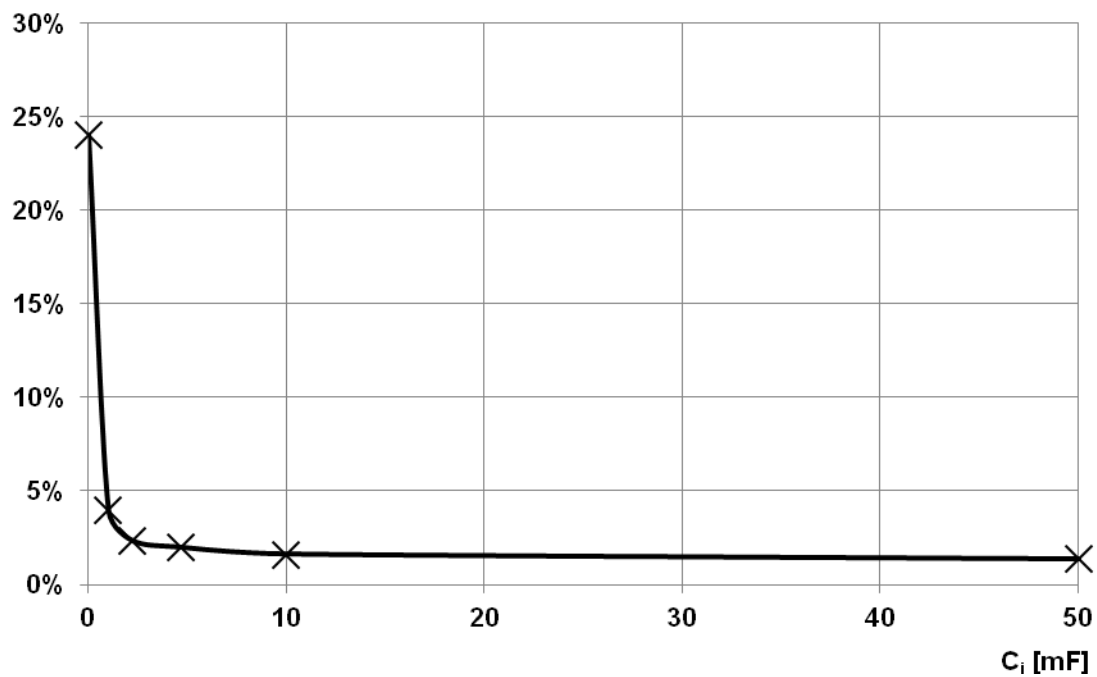
$$\Delta U_{(\%)_d} = \frac{\Delta U_d}{U_{d_RMS}} \cdot 100 = \frac{130}{541} \cdot 100 = 24,0\% \quad (36)$$

V teoretickém návrhu kapacity kondenzátorové baterie byla vypočítána hodnota $C_i = 2,2$ mF. Výchozím bodem výpočtu bylo stanoveno zvlnění napětí meziobvodu na 2,26 %. Při simulaci byla zjišťována závislost zvlnění napětí meziobvodu ΔU_d na kapacitě kondenzátorové baterie (obr. 27). Pro hodnotu $C_i = 2,2$ mF byla zjištěna hodnota zvlnění napětí 2,33 % (tab. 7).

Tab. 7. Závislost zvlnění napětí meziobvodu $\Delta U_{\%_d}$ na kapacitě jednoho kondenzátoru C_i

$f_s = 2000$ Hz						
C_i [mF]	0,001	1,0	2,2	4,7	10,0	50,0
ΔU_d [%]	24,03%	4,72%	2,33%	1,97%	1,61%	1,34%

ΔU_d [%]

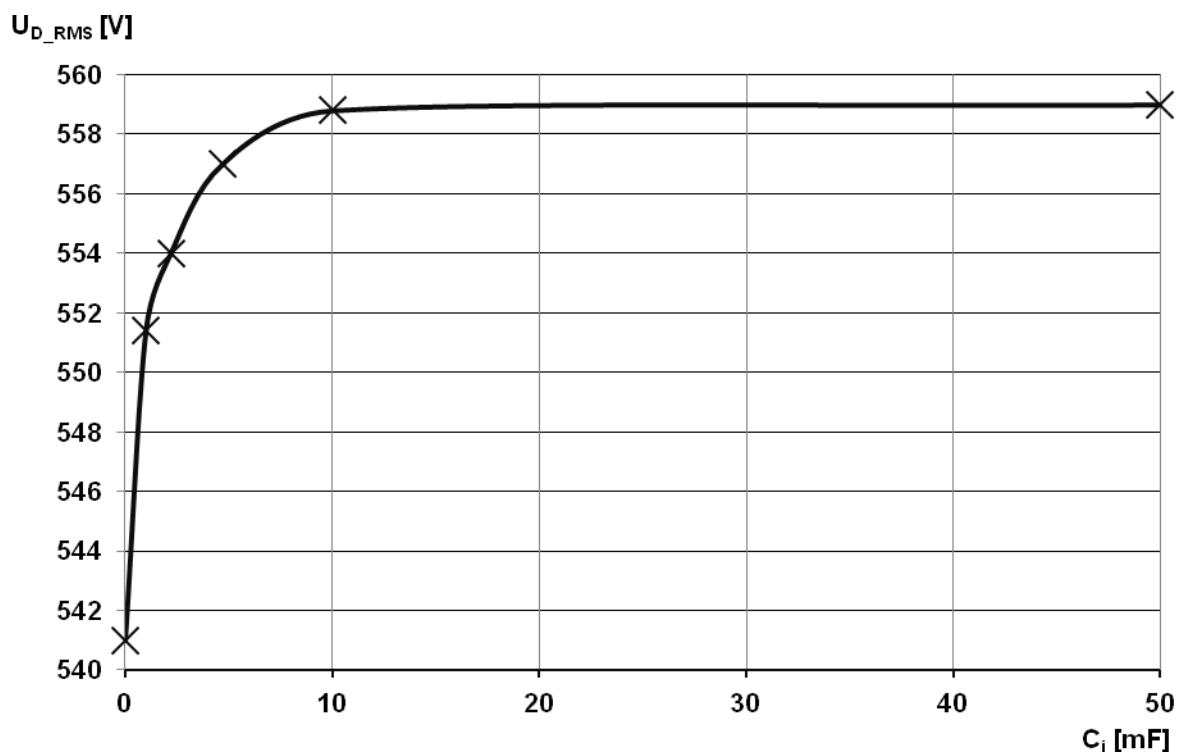


Obr. 27. Graf závislosti zvlnění napětí v meziobvodu na kapacitě jednoho kondenzátoru

3.3.2 Simulace napětí meziobvodu a kapacity kondenzátoru

Tab. 8. Závislost napětí meziobvodu U_d na kapacitě jednoho kondenzátoru C_i

$f_s = 2000 \text{ Hz}$						
$C_i \text{ [mF]}$	0,001	1,0	2,2	4,7	10,0	50,0
$U_{d_RMS} \text{ [V]}$	541	551	557	558	559	559



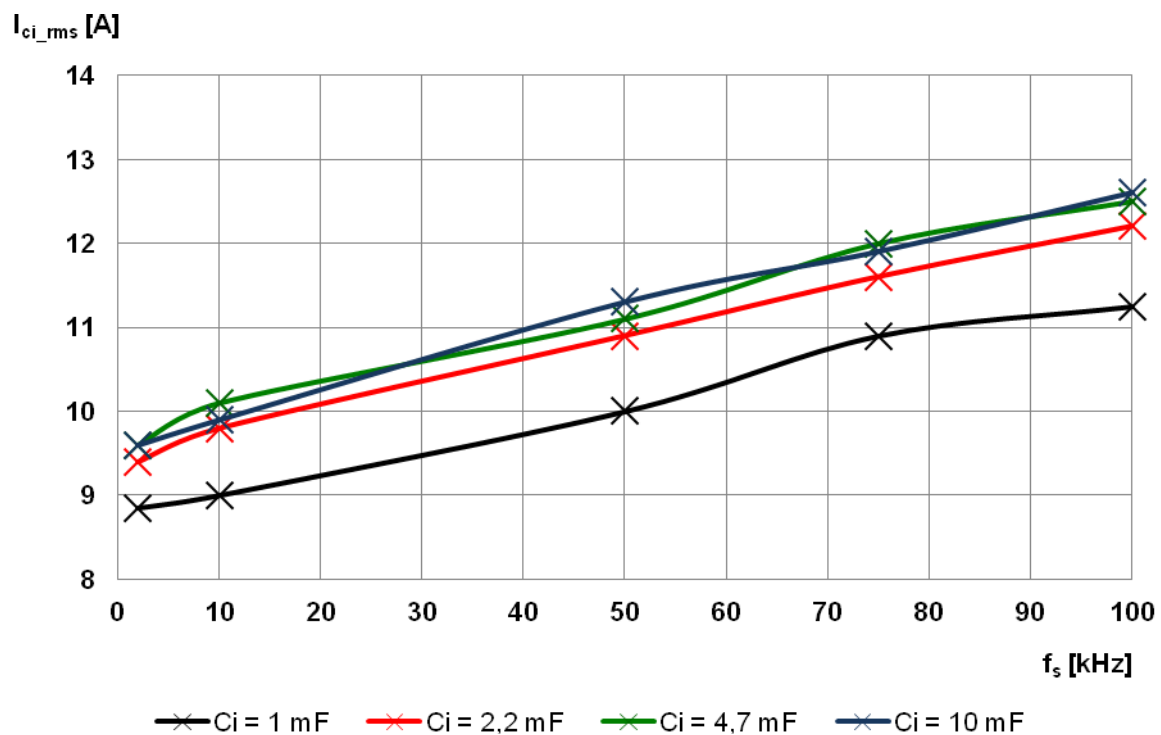
Obr. 28. Graf závislosti napětí v meziobvodu na kapacitě jednoho kondenzátoru

Z hodnot zjištěných simulací vyplývá (tab. 8), že od určité hodnoty C_i je hodnota napětí U_{D_RMS} již konstantní (obr. 28).

3.3.3 Simulace proudu kondenzátorem a spínací frekvence

Tab. 9. Závislost proudu kondenzátorem I_{ci_rms} na frekvenci f_s pro různé hodnoty kapacity C_i

f_s [kHz]	2	10	50	75	100
$C_i = 1$ mF					
I_{ci_rms} [A]	8,9	9,0	10,0	10,9	11,3
$C_i = 2,2$ mF					
I_{ci_rms} [A]	9,4	9,8	10,9	11,6	12,2
$C_i = 4,7$ mF					
I_{ci_rms} [A]	9,6	10,1	11,1	12,0	12,5
$C_i = 10$ mF					
I_{ci_rms} [A]	9,6	9,9	11,3	11,9	12,6



Obr. 29. Graf závislosti proudu kondenzátorem na spínací frekvenci f_s

Z hodnot zjištěných simulací (tab. 9) plynou tyto zjištěné závislosti:

- velikost proudu I_{ci_RMS} je skoro nezávislá na kapacitě C_i ,
- velikost proudu I_{ci_RMS} je závislá na spínací frekvenci střídače f_s .

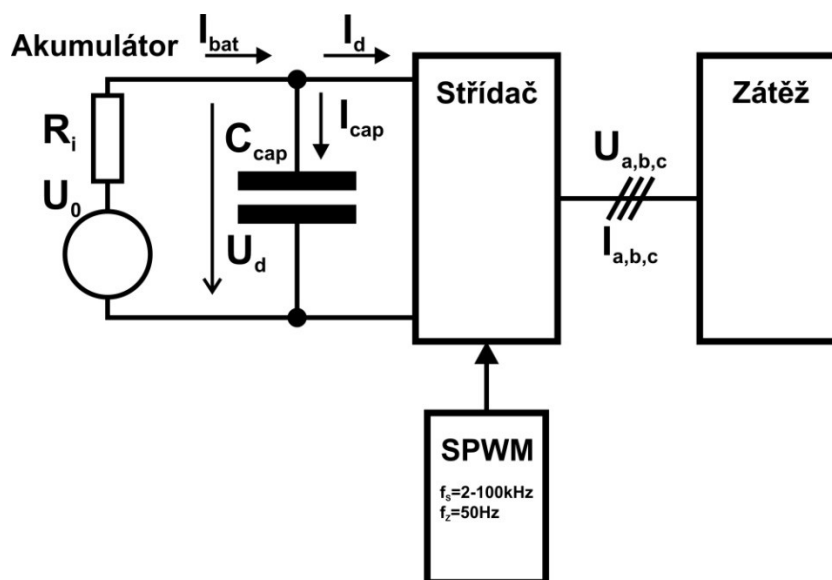
4. Návrh kondenzátorové baterie pro měnič napájený z akumulátoru

4.1 Rozbor návrhu

Akumulátorový zdroj je charakterizován malým vnitřním odporem, který se mění podle stavu nabití akumulátoru a stárnutím. Cílem návrhu je minimalizovat zvlnění proudu odebíraného z akumulátoru. Charakteristickým znakem zátěže se střídačem je velké množství harmonických proudů, které vznikají modulací *SPWM*. Proud procházející kondenzátorovou baterií způsobuje zahřívání kondenzátoru ztrátovým výkonem. Zvýšení teploty má přímý vliv na životnost kondenzátorů. Dalším faktorem je maximální povolené napětí a maximální povolený proud. V simulační části jsou zjišťovány závislosti zvlnění proudu na hodnotách kondenzátoru C_i baterie a spínací frekvence f_s .

4.2 Popis zapojení a nastavení veličin

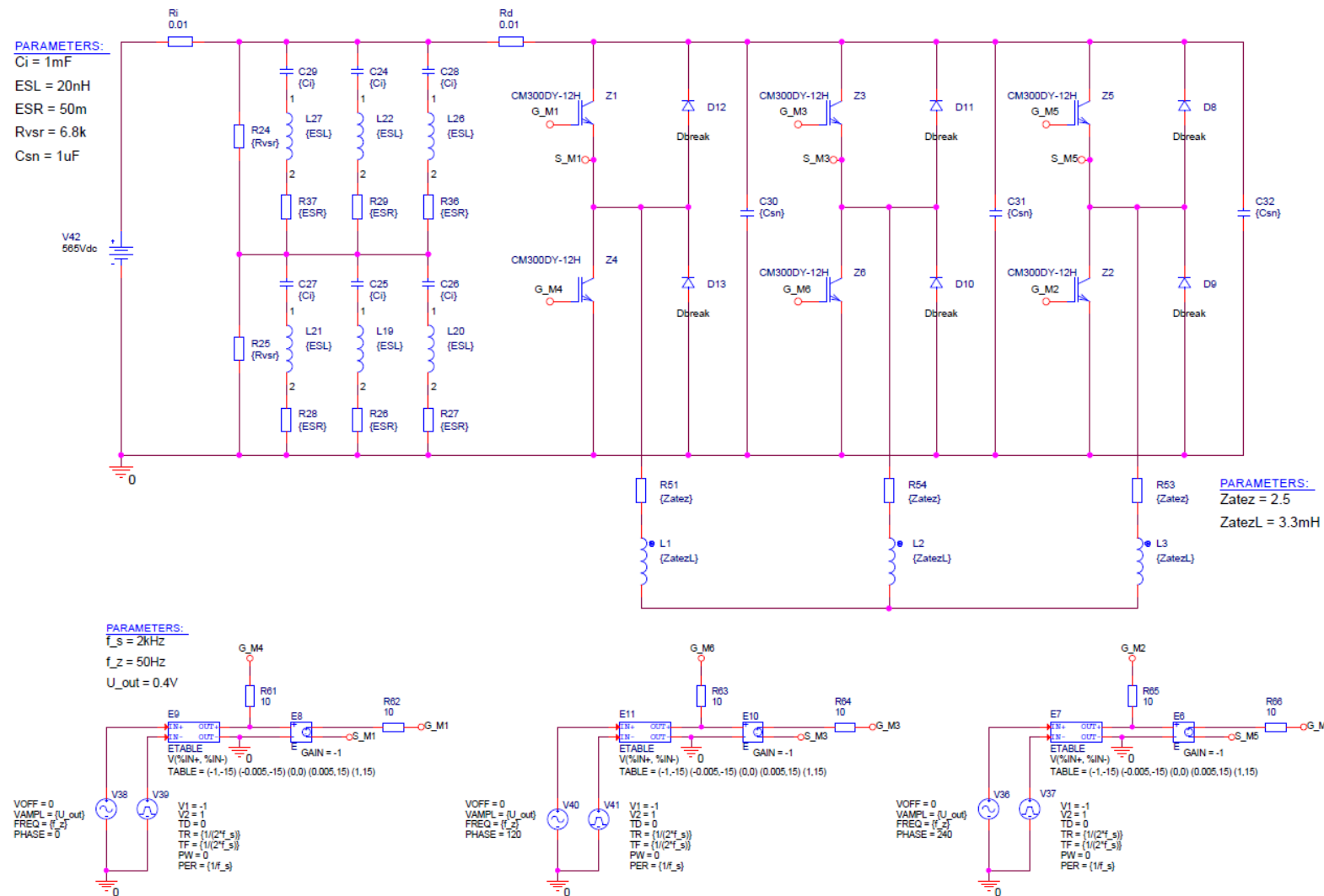
K ověření návrhu bylo v simulačním programu OrCAD vytvořeno zapojení, skládající se z akumulátorové baterie s vnitřním odporem R_i . Na zdroj je připojena zátěž, tvořena střídačem s IGBT tranzistory buzenými *SPWM* modulací o frekvenci modulace f_s . Mezi akumulátor a střídač je připojena baterie kondenzátorů. Na výstup střídače je připojena motorická zátěž, jež představuje zjednodušený model asynchronního motoru (tab. 10). Tvoří ji obvod R-L zapojený do hvězdy. Zjednodušené schéma tohoto obvodu je na obr. 30 a simulační schéma znázorňuje obr. 31:



Obr. 30. Blokové schéma zapojení akumulátor-střídač

Tab. 10. Nastavení obvodových veličiny

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka	Označení ve schématu
Zdroj				
Napětí zdroje	U_0	565	[V]	U_f
Vnitřní odpor zdroje	R_i	proměnná	[Ω]	R_i
Střídač	Z1 - Z6			
Typ IGBT	CM300DY – 12H			
Napětí kolektor - emitor	U_{CE}	600	[V]	
Proud kolektoru	I_c	300	[A]	
Zátěž	R - L			
Odpor	R	2,5	[Ω]	Zatez
Indukčnost	L	3,3	[mH]	ZatezL



Obr. 31. Schéma střídače napájeného z akumulátoru v programu OrCAD

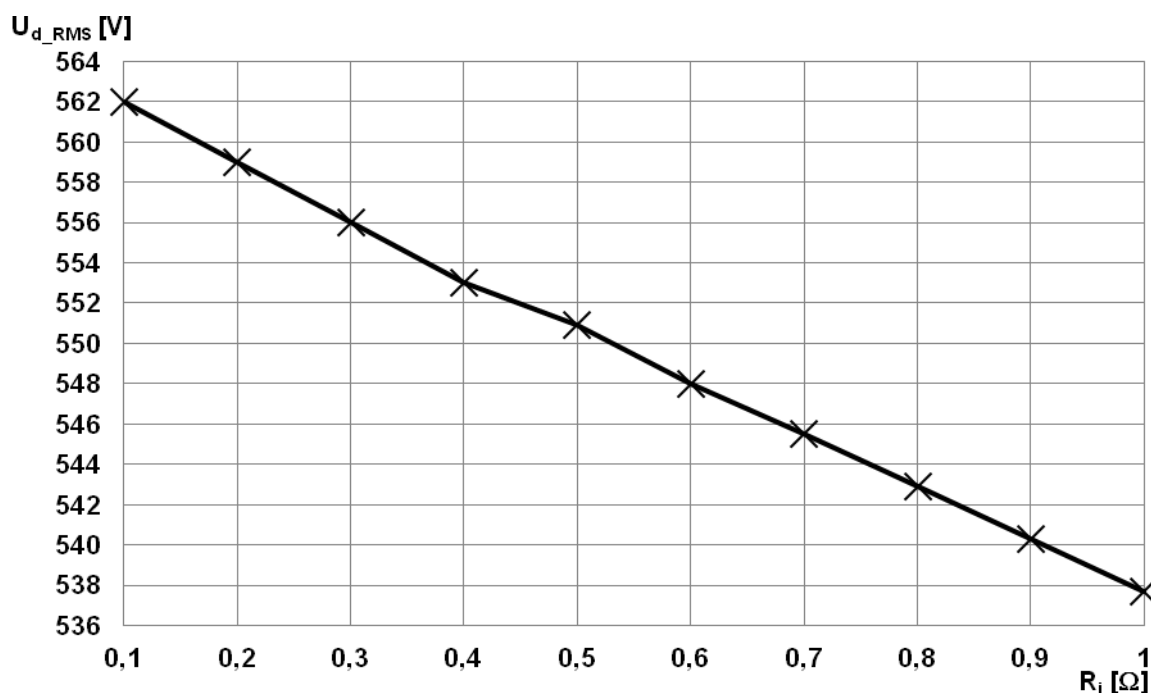
4.3 Výsledky simulací obvodu kondenzátorové baterie se stejnosměrným napájením

Změna vnitřního odporu může být způsobena vybitím akumulátoru nebo jeho stárnutím. Závislosti různých veličin na vnitřním odporu byly analyzovány v tomto bodě. Nejvýraznější závislost je závislost výstupního napětí akumulátoru (totožné s napětím meziobvodu) na hodnotě vnitřního odporu R_i (tab. 11.).

4.3.1 Simulace napětí meziobvodu a vnitřního odporu akumulátoru

Tab. 11. Závislost napětí U_d na vnitřním odporu baterie R_i

$C_i = 2,2 \text{ mF}, f_s = 2 \text{ kHz}$										
$R_i [\Omega]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{d_RMS} [V]$	562	559	556	553	550,9	548	545,5	542,9	540,3	537,7



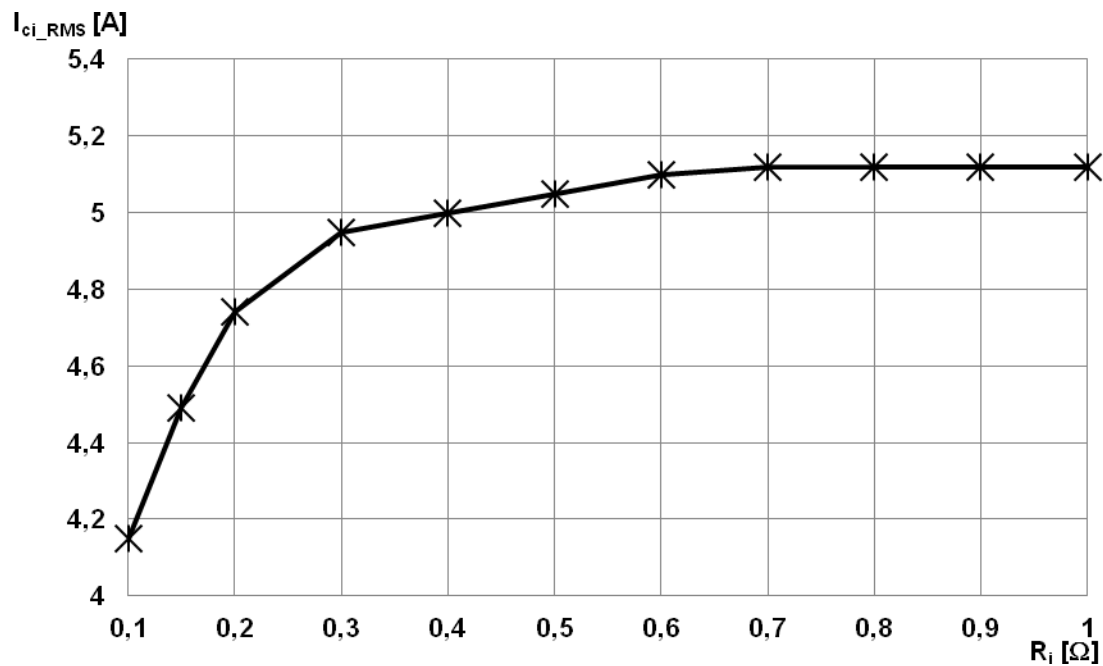
Obr. 32. Graf závislosti napětí meziobvodu na vnitřním odporu

Se zvyšujícím se vnitřním odporem R_i klesá napětí na meziobvodu U_{d_RMS} . Zvětšuje se úbytek napětí na vnitřním odporu R_i .

4.3.2 Simulace proudu jednoho kondenzátoru a vnitřního odporu akumulátoru

Tab. 12. Závislost proudu jedním kondenzátorem I_{ci} na vnitřním odporu baterie R_i

$C_i = 2,2 \text{ mF}, f_s = 2 \text{ kHz}$											
$R_i [\Omega]$	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_{ci_RMS} [A]$	4,15	4,49	4,74	4,95	5	5,05	5,1	5,12	5,12	5,12	5,12



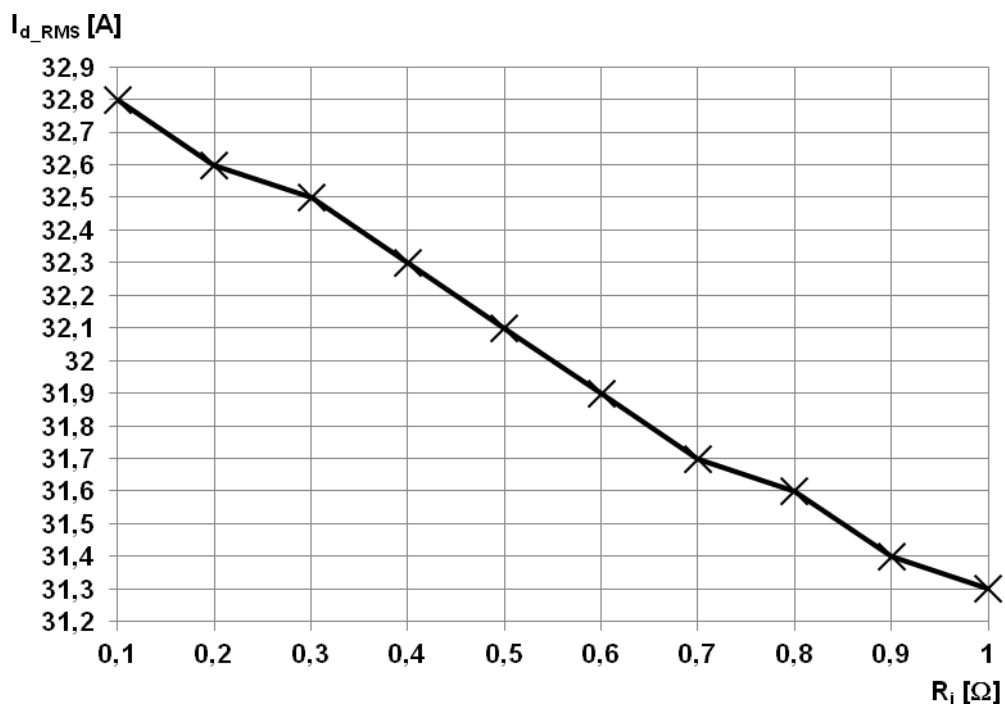
Obr. 33. Graf závislosti proudu jedním kondenzátorem na vnitřním odporu

Se zvyšujícím se vnitřním odporem R_i stoupá proud v kondenzátoru baterie I_{ci_RMS} .

4.3.3 Simulace proudu meziobvodu a vnitřního odporu akumulátoru

Tab. 13. Závislost proudu I_{d_RMS} na vnitřním odporu baterie R_i

$C_i = 2,2 \text{ mF}$, $f_s = 2 \text{ kHz}$										
$R_i [\Omega]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$I_{d_RMS} [\text{A}]$	32,8	32,6	32,5	32,3	32,1	31,9	31,7	31,6	31,4	31,3



Obr. 34. Graf závislosti proudu meziobvodu na vnitřním odporu

Se zvyšujícím se vnitřním odporem R_i klesá proud I_{d_RMS} .

4.3.4 Simulace zvlnění proudu při různé spínací frekvenci

Pro zjišťování závislostí proudu a zvlnění I_{bat} byl zvolen rozsah kapacit C_i od 1 μF (situace bez připojené baterie), až po extrémní kapacitu 50 mF (tab. 15), (obr. 35).

Spínací frekvence f_s byla měněna od 2 kHz do 100 kHz.

Výpočet zvlnění proudu

Tab. 14. Hodnoty pro výpočet zvlnění proudu v meziobvodu

I_{bat_max} [A]	39,0
I_{bat_min} [A]	24,0
I_{bat_RMS} [A]	28,5
ΔI_{bat} [%]	52,6%

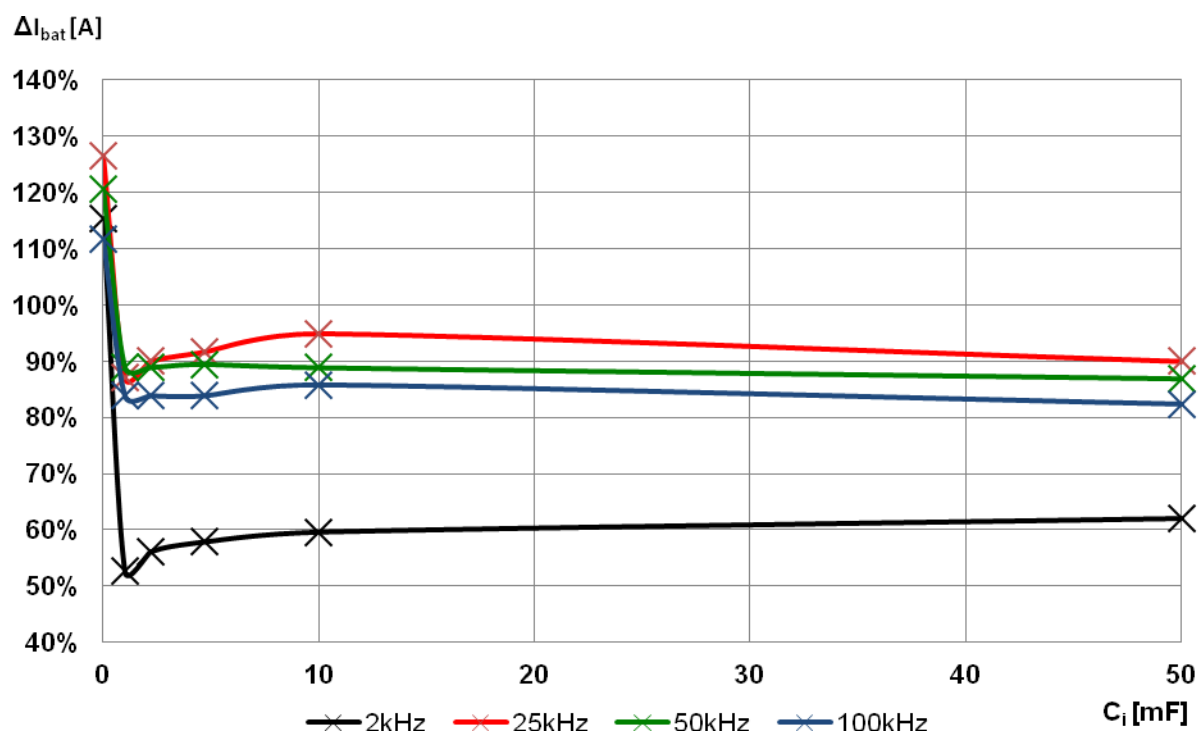
$$\Delta I_{bat} = I_{bat_max} - I_{bat_min} = 39 - 24 = 15 A \quad (37)$$

Výpočet poměrného zvlnění proudu

$$\Delta I_{bat} = \frac{\Delta I_{bat}}{U_{bat_RMS}} \cdot 100 = \frac{15}{28,5} \cdot 100 = 52,6\% \quad (38)$$

Tab. 15. Závislost zvlnění proudu akumulátoru ΔI_{bat} na kapacitě C_i pro různé frekvence f_s

$R_i = 0,1 \Omega$						
C_i [mF]	0,001	1,0	2,2	4,7	10,0	50,0
$f_s = 2 \text{ kHz}$						
ΔI_{bat} [%]	115%	53%	56%	58%	60%	62%
$f_s = 25 \text{ kHz}$						
ΔI_{bat} [%]	126%	87%	90%	92%	95%	90%
$f_s = 50 \text{ kHz}$						
ΔI_{bat} [%]	121%	89%	89%	89%	89%	87%
$f_s = 100 \text{ kHz}$						
ΔI_{bat} [%]	112%	84%	84%	84%	86%	82%

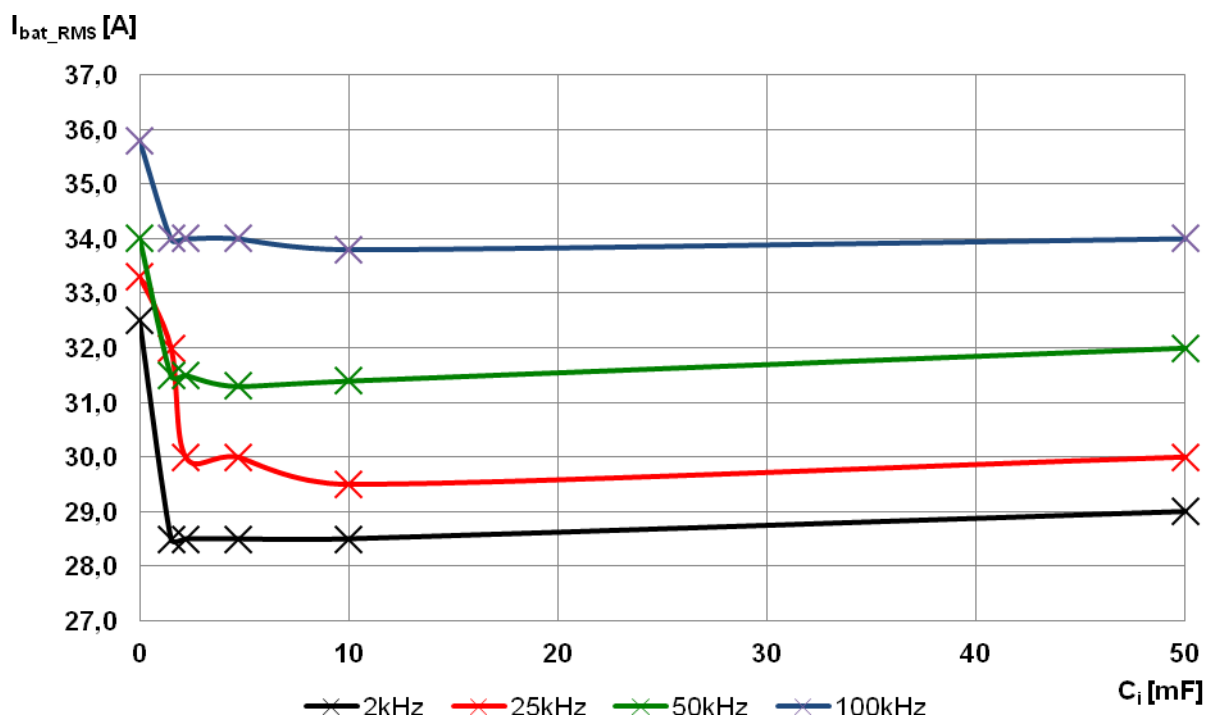


Obr. 35. Graf závislosti zvlnění proudu na kapacitě kondenzátoru při různých f_s

Od určité hodnoty kapacity kondenzátoru C_i je hodnota zvlnění ΔI_{bat} konstantní nebo se mění jen málo. Spínací frekvence f_s nemá vliv na zvlnění. Zvlnění je vypočítáno jako poměrná hodnota maxima-minima k hodnotě RMS a proto pokles zvlnění může být způsoben zvýšením hodnoty RMS .

Tab. 16. Závislost proudu akumulátoru I_{bat} na kapacitě C_i pro různé frekvence f_s

$R_i = 0,1 \Omega$						
C_i [mF]	0,001	1,0	2,2	4,7	10,0	50,0
$f_s = 2 \text{ kHz}$						
I_{bat_RMS} [A]	32,5	28,5	28,5	28,5	28,5	29,0
$f_s = 25 \text{ kHz}$						
I_{bat_RMS} [A]	33,3	32,0	30,0	30,0	29,5	30,0
$f_s = 50 \text{ kHz}$						
I_{bat_RMS} [A]	34,0	31,5	31,5	31,3	31,4	32,0
$f_s = 100 \text{ kHz}$						
I_{bat_RMS} [A]	35,8	34,0	34,0	34,0	33,8	34,0



Obr. 36 Graf závislosti proudu akumulátoru na kapacitě kondenzátoru při různých f_s

5. Výpočet životnosti kondenzátoru

Životnost kondenzátoru ovlivňuje několik faktorů. Hlavní faktor je provozní teplota kondenzátoru a ta je daná teplotou okolí, tepelným odporem a ztrátovým výkonem.

Teplotu okolí můžeme snižovat prouděním vzduchu. Tepelný odpor je dán konstrukcí kondenzátoru a prouděním vzduchu (tab. 2). Ztrátový výkon je součtem výkonů způsobený jednotlivými harmonickými proudy (pro neharmonický periodický průběh) na odporu ESR . Hodnota ESR je závislá na provozní teplotě a frekvenci (tab. 1).

Pro konstrukci baterie byl vybrán kondenzátor Kendeil z řady K01typ K01350102__M0G105 (tab. 17). Proudění jednotlivých harmonických byly zjištěny z modelu ORCAD (tab. 18).

Tab. 17. Parametry kondenzátoru

K01 K01350102__M0G105	
ESR [mΩ]	79
L _{OPMAX} [h]	15000
T _{op} [°C]	85
T _a [°C]	45
R _{th} [°C/W]	1,5

Frekvence harmonické je násobkem spínací frekvence f_s , $f_s = 2kHz$. V tabulce jsou uvedeny čtyři nejvyšší harmonické frekvence (tab. 18).

Tab. 18. Tabulka výpočtu ztrátového výkonu P_{TOT}

Řada K01 K01350102__M0G105 ESR = 79 mΩ						
n	f [Hz]	I _{cin_A} [A]	I _{cin_rms} [A]	k _f	ESR (f)	P [W]
1	2000	4,50	3,18	0,43	33,97	0,3439
2	4000	2,40	1,70	0,42	33,18	0,0956
3	6000	1,40	0,99	0,42	33,18	0,0325
4	8000	1,00	0,71	0,42	33,18	0,0166
					P _{tot} [W]	0,4886

Vypočet ztrátového výkonu jednoho harmonického proudu

$$P = ESR \cdot k_f \cdot I_{ci_rms}^2 = 79 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43 \cdot 3,18^2 = 0,3439W \quad (39)$$

Vypočet teploty kondenzátoru

$$T = T_a + R_{th} \cdot P_{tot} = 45 + 1,5 \cdot 0,4886 = 45,73^\circ C \quad (40)$$

Výpočet životnosti kondenzátoru

$$L_{op} = L_{op\ max} \cdot 2^{(T_{op}-10-T)/10} = 15000 \cdot 2^{(85-10-45,73)/10} = 456000h \quad (41)$$

6. Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh kondenzátorové baterie pro měnič se stejnosměrným napájením a provedení simulací kondenzátorové baterie v programu OrCAD, kde byly sledovány vlivy parametrů zdroje, zátěže a modulačního kmitočtu na parametrech kondenzátorové baterie. Chování kondenzátorové baterie bylo simulováno pro případ střídavého a stejnosměrného napájení.

V praktické části byl simulací ověřen teoretický návrh kapacity kondenzátoru. Zadaným vstupním parametrem bylo zvlnění napětí meziobvodu. V návrhu není uvažován vliv připojeného měniče s SPWM modulací. Cílem bylo ověřit, jaký vliv má velikost kondenzátoru na hodnotu zvlnění napětí. Pro velikost kondenzátoru 2,2 mF je zvlnění napětí přibližně shodné se zadanou hodnotou pro výpočet.

V dalším bodě při návrhu kondenzátorové baterie pro napájení střídače akumulátorem spočívalo hledání velikosti kapacity v dosažení zadaného zvlnění proudu z akumulátoru. Závislost byla taková, že od určité velikosti kapacity, zvyšování nemá vliv na zlepšení zvlnění proudu baterie. Postačující byla kapacita kondenzátoru 1mF. Nižší kapacitou se omezí velikost nabíjecího proudu. Zvýšení spínací frekvence f_s způsobuje vyšší odběr proudu z akumulátoru, který není závislý na velikosti kapacity.

Jako jeden z problémů použití elektrolytických kondenzátorů se jeví přehřívání a tím i zkracování životnosti. Velký vliv na velikost ztrátového výkonu mají proudy vyšších harmonických kmitočtů. Jelikož měnič SPWM je zdrojem neharmonických průběhů, jsou kondenzátorové baterie vystaveny jak impulznímu zatížení, tak proudu s velkým obsahem harmonických.

Cílem použití kondenzátorové baterie je omezení zvlnění proudu nebo napětí. Kondenzátor se chová jako zdroj. Simulací bylo prokázáno, že zvětšování kapacity nemá již reálný vliv na parametr zvlnění. Velká kapacita baterie naopak způsobuje enormní nabíjecí proud. Jištění napájecích obvodů je problematické. Na velikost nabíjecího proudu má také vliv vnitřní impedance zdroje, která omezuje nabíjecí proud.

Dalším faktorem je napětíové a proudové zatížení, které můžeme ovlivnit sérioparalelní kombinací kondenzátorů. Sériovým spojováním snižujeme napětí, paralelním spojováním snižujeme proud.

Životnost kondenzátoru je dána pracovní teplotou. Pokud chceme snížit ztrátový výkon, musíme použít kondenzátory s co nejnižším sériovým odporem ESR, Hodnota ESR je závislá na pracovní teplotě a frekvenci. K snížení teploty můžeme používat také aktivní chlazení.

Na životnost má také vliv, v jakém rozsahu je pracovní napětí vzhledem k maximálnímu napětí. Firma Kendeil má ve svém sortimentu různé řady kondenzátorů určených pro různé typy aplikací viz (Příloha 1).

Literatura

- [1] PowerGuru: *Portál článků o kondenzátorech*, dostupný na WWW:
<<http://www.powerguru.org/category/power-electronics-devices/capacitors/>>
- [2] VOBECKÝ, J. ZÁHLAVA, V. *Elektronika součástky a obvody, principy a příklady*. 2. vyd. Praha: Grada, 2001. 192 s. ISBN 80 – 7169 – 884 – 9
- [3] BEZDĚK, M, *Elektronika I*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2007. 271 s. ISBN 978 – 807232 – 321 – 0.
- [4] PELČÁK, J. *Transport elektrického náboje v tantalovém kondenzátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 141 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Lubomír Grmela, CSc.
- [5] Universidad de Buenos Aires: Electrolytic Capacitors Application Guide
<http://materias.fi.uba.ar/6648/archivos/RIFA_electrolytic_appguide.pdf>
- [6] Elektronik service: *Článek o elektrolytických kondenzátorech*, dostupný na WWW:
<http://www.electronicsservis.cz/files/mereni_a_formovani_elektrolytickych_kondenzatoru.pdf>
- [7] VONDRÁŠEK, F. *Výkonová elektronika, svazek III, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. 1. vyd. ZČU Plzeň, 1998. 252 s. ISBN 80-7082-485-9. Kapitola 9, Nepřímé měniče kmitočtu, s. 217.
- [8] *Oficiální stránky firmy Kendeil*, dostupný na WWW: <www.kendeil.com>

